

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

Vyvedení výkonu kogenerační jednotky do distribuční soustavy  
Cogeneration Unit to Distribution Network electricity Supply

# Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Krejčí**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika

Téma: Vyvedení výkonu z kogenerační jednotky do distribuční soustavy  
Cogeneration Unit to Distribution Network Electricity Supply

Zásady pro vypracování:

1. Energetický přínos kogenerace
2. Druhy kogeneračních jednotek
3. Zkratky v elektrických sítích
4. Výpočet zkratových poměrů v zadané síti
5. Kontrola kabelů na tepelné účinky zkratových proudů
6. Návrh nastavení ochran
7. Zhodnocení a závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Hradílek Z. : Elektroenergetika, skripta VŠB Ostrava 1992
2. Santarius P. : Elektrické stanice a vedení, skripta VŠB Ostrava 1990
3. Technická dokumentace kogeneračních jednotek

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015



---

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
*vedoucí katedry*



---

prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
*děkan fakulty*

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 7. 5. 2015

.....  
Bc. Petr Krejčí

## Poděkování

Rád bych poděkoval panu prof. Ing. Stanislavu Ruskovi, CSc. za odborné vedené, cenné rady, vstřícnost a trpělivost, panu Ing. Martinu Golasowskému Ph. D. za odbornou konzultaci a věcné rady, které mi byly užitečné k vytvoření této diplomové práce.

## Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou připojení nových kogeneračních jednotek do distribuční sítě. Práce obsahuje teoretickou a praktickou část s výpočtem. V teoretické části je shrnuta problematika kogeneračních jednotek a zkratových jevů. V praktické části je proveden výpočet zkratových jevů při přidání dvou nových synchronních generátorů a návrh silových kabelů s ohledem na tepelné účinky zkratového proudu. Jsou navrženy 2 varianty. První s malou bezpečnostní rezervou (trvání zkratového proudu) a druhá s dostatečnou rezervou.

Pro druhou variantu kabelů jsou dále navrženy nadproudové ochrany, které chrání rozvod před možnými zkraty.

**Klíčová slova:** Zkrat; kogenerační jednotka; návrh vysokonapětového kabelu; ochrana; návrh nastavení ochran

## **Abstract**

This thesis deals with the connection of new cogeneration units to an electric power distribution system. It consists of a theoretical and practical part of ~~the~~ calculation. The theoretical part ~~is~~ summarizes issues with cogeneration units and short circuit phenomena. The practical part contains a calculation of short circuit phenomena when two new synchronous generators are added, and a power cables design with regard to the thermal effects of short circuit current. Two possibilities are proposed, one with a minimum safety reserve (short circuit current duration) and the other with a sufficient reserve.

Current limiting is also designed for the second variant of the cables, which protects the supply against possible short circuits

**Key Words:** short-circuit; cogeneration unit; design of high voltage power cable; protection; protection design

## Seznam značek a symbolů

KVET		Kombinovaná výroba elektrické energie a tepla
KGJ		Kogenerační jednotka
PDS		Provozovatel distribuční soustavy
$c_0$	(J·cm <sup>-3</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	Specifické teplo pro 0 °C
$c$	(-)	Součinitel ekvivalentního napětového zdroje
$E_{KVET}$	(GJ, MWh)	Elektrická energie vyrobena v procesu KVET
$f$	(Hz)	Frekvence sítě
$I_1$	(A)	Primární proud transformátoru
$I_2$	(A)	Sekundární proud transformátoru
$I_D$	(A)	Dovolený proud pro dané uložení
$I_Z$	(A)	Zatěžovací proud
$I_{max}$	(A)	Maximální trvale dovolený proud
$I_{kap}$	(A)	Kapacitní proud zemním spojením
$I_K''$	(A)	Počáteční souměrný rázový zkratový proud (efektivní hodnota)
$I_{K2}''$	(A)	Počáteční souměrný rázový 2f zkratový proud (efektivní hodnota)
$I_{K1}''$	(A)	Počáteční souměrný rázový 1f zkratový proud (efektivní hodnota)
$I_S$	(A)	Rozběhový proud ochrany
$I_{sd}$	(A)	Vybavovací proud časově nezávislé zpožděné (selektivní) spouště
$I_{th}$	(A)	Ekvivalentní oteplovací proud (efektivní hodnota)
$I_S >$	(A)	Rozběhový proud nadproudového článku
$I_S \gg$	(A)	Rozběhový proud zkratového článku
$i_p$	(kA)	Nárazový zkratový proud
$k$	(-)	Koeficient respektující teplotu před zkratem a po zkratu a dále fyzikální vlastnosti vodiče
$k_1$	(-)	Součinitel pro okolní teplotu země odlišnou od 20 °C
$k_2$	(-)	Přepočítací součinitel pro kabely uložené přímo v zemi nebo v protahovacích elektroinstalačních kanálech uložených v zemi
$l$	(m)	Délka
$m$	(-)	Součinitel pro tepelný účinek ss. složky zkratového proudu
$n$	(-)	Součinitel pro tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu
$P_n$	(kW)	Jmenovitý činný výkon
$Q_{KVET}$	(GJ, MWh)	Teplo vyrobené v procesu KVET
$Q_{pal-KVET}$	(GJ, MWh)	Spotřeba tepla v palivu ve zdroji KVET
$R$	(Ω)	Rezistance, absolutní popřípadě poměrná hodnota
$R_k$	(Ω/km)	Razistance kabelu na kilometr délky
$R_{kv}$	(Ω)	Rezistance kabelového vedení
$R_{20}$	(Ω)	Rezistance při teplotě 20 °C
$S$	(mm <sup>2</sup> )	Průřez vodiče
$S_K''$	(MVA)	Počáteční souměrný rázový zkratový výkon
$S_{min}$	(mm <sup>2</sup> )	Minimální průřez vodiče, který odolá zkratovému proudu
$S_n$	(kVA)	Jmenovitý zdánlivý výkon
$t_k$	(s)	Doba trvání zkratu

$k_{vch}$	(-)	Koeficient udávající sklon vypínací char. dle IEC 60255-3 (v této normě je tento koeficient značen $k$ )
$t \gg$	(s)	Vypínací čas zkratové spouště
$T_k$	(s)	Doba trvání zkratového proudu
$u_k$	(%)	Napětí nakrátko transformátoru (jmenovité)
$U_n$	(V)	Jmenovité napětí sítě
$U_s$	(V)	Napětí spotřebiče
$U_z$	(V)	Napětí zdroje
$X_d''$	( $\Omega$ )	Rázová reaktance synchronního stroje
$X_k$	( $\Omega/\text{km}$ )	Reaktance kabelového vedení na kilometr délky
$X_S$	( $\Omega$ )	Reaktance soustavy
$X_{kv}$	( $\Omega$ )	Reaktance kabelového vedení
$Z$	( $\Omega$ )	Impedance, absolutní příp. poměrná hodnota
$Z_1$	( $\Omega$ )	Impedance přepočtena na napětíovou hladinu $U_2$ v místě zkratu
$Z_2$	( $\Omega$ )	Impedance zařízení na napětíové hladině $U_1$
$\underline{Z}_{(1)}, \underline{Z}_{(2)}, \underline{Z}_{(0)}$	( $\Omega$ )	Impedance sousledné, zpětné a netočivé třífázové soustavy
$\underline{Z}_k$	( $\Omega$ )	Zkratová impedance trojfázové střídavé soustavy
$Z_Q$	( $\Omega$ )	Sousledná impedance nadřazené sítě
$Z_s$	( $\Omega$ )	Impedance spotřebiče
$Z_T$	( $\Omega$ )	Sousledná impedance transformátoru
$Z_v$	( $\Omega$ )	Impedance vedení
$\cos \varphi$	(-)	Účinník
$\alpha$	( $K^{-1}$ )	Teplotní součinitel elektrického odporu
$\eta_{KVET}^{el}$	(%)	Účinnost výroby elektrické energie ve zdroji KVET
$\eta_{KVET}^q$	(%)	Účinnost výroby užitečného tepla ve zdroji KVET
$\eta_{KVET}^{celk}$	(%)	Celková účinnost zdroje KVET
$\vartheta_f$	( $^{\circ}\text{C}$ )	Fiktivní teplota vodiče dle materiálu (228 $^{\circ}\text{C}$ pro hliník)
$\vartheta_m$	( $^{\circ}\text{C}$ )	Nejvyšší dovolená provozní teplota jádra vodiče
$\vartheta_k$	( $^{\circ}\text{C}$ )	Maximální dovolená teplota vodiče při zkratu
$\vartheta_0$	( $^{\circ}\text{C}$ )	Počáteční teplota jádra vodiče
$\vartheta_1$	( $^{\circ}\text{C}$ )	Teplota vodiče před zkratem (provozní)
$\Delta\vartheta$	( $^{\circ}\text{C}$ )	Rozdíl dvou teplot
$\Delta\vartheta_{max}$	( $^{\circ}\text{C}$ )	Nejvyšší dovolené provozní oteplení vodiče
$\Delta\vartheta_z$	( $^{\circ}\text{C}$ )	Oteplení způsobené průchodem zatěžovacího proudu
$\kappa$	(-)	Součinitel pro výpočet nárazového proudu
$\rho_{20}$	( $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ )	Specifický odpor při 20 $^{\circ}\text{C}$
$\sigma$	(-)	Teplárenský modul
$\varphi$	( $^{\circ}$ )	Fázový úhel



# Obsah

Úvod.....	1
1. Energetický přínos kogenerace .....	2
1.1 Kogenerace.....	2
1.1.1 Teplárenský modul.....	2
1.1.2 Účinnosti zdrojů KVET .....	3
1.2 Přínos oproti klasickým elektrárnám a teplárnám.....	4
1.2.1 Energetický přínos .....	4
1.2.2 Ekologický přínos .....	4
1.3 Nevýhody kogeneračních jednotek .....	5
1.4 Využití kogeneračních jednotek v praxi.....	5
1.4.1 Teplárenská výroba .....	5
1.4.2 Kondenzační elektrárny s možností dodávky tepla.....	5
1.4.3 Průmyslové využití.....	5
1.4.4 Stavby občanské vybavenosti .....	6
2. Druhy kogeneračních jednotek .....	7
2.1 S parní turbínou.....	7
2.2 S plynovou turbínou.....	9
2.3 S pístovým spalovacím motorem.....	11
2.4 Paroplynová zařízení.....	13
2.5 Ostatní.....	14
3. Zkratky v elektrických sítích.....	15
3.1 Příčiny zkratů .....	15
3.2 Typy zkratů vznikající při poruchách.....	15
3.2.1 Nesouměrný zkrat .....	15
3.2.2 Souměrný zkrat .....	16
3.3 Rovnice pro výpočet počátečního rázového zkratového proudu.....	16
3.3.1 Trojfázový zkrat .....	16
3.3.2 Dvofázový zkrat .....	16
3.3.3 Jednofázový zkrat.....	16
3.4 Následky zkratových proudů.....	16
3.4.1 Tepelné účinky .....	16
3.4.2 Dynamické účinky .....	17
4. Výpočet zkratových poměrů v zadané síti .....	18
4.1 Přehledové schéma rozvodny.....	18
4.2 Legenda značení tabulek.....	19
4.3 Předběžný návrh kabelů 6 kV .....	20
4.3.1 Provozní teploty kabelů.....	22
4.3.2 Určení sousledných impedancí soustavy.....	23
4.3.3 Výsledné hodnoty zkratových poměrů (K3-K7 S=150 mm <sup>2</sup> ) .....	26
4.3.4 Kontrola kabelů na tepelné účinky zkratových proudů (K3-K7 S=150 mm <sup>2</sup> ) .....	27
4.4 Optimální návrh kabelů (K3-K7 S=185 mm <sup>2</sup> ) .....	28
4.4.1 Sousledné impedance soustavy .....	28
4.4.2 Provozní teplota kabelů (K3-K7 S=185 mm <sup>2</sup> ) .....	28
4.4.3 Výsledné hodnoty zkratových poměrů (K3-K7 S=185 mm <sup>2</sup> ) .....	29

4.4.4	Kontrola kabelů na tepelné účinky zkratových proudů (K3-K7 S=185mm <sup>2</sup> ) .....	30
4.4.5	Ověření kabelů NN 8x(1-CYKY 3x240+120) .....	32
4.4.6	Ověření výsledků s programem Zkratý 2.0 .....	34
4.4.7	Elektrické ztráty v rozvodu .....	37
5.	Nastavení ochran .....	38
5.1	Síťová ochrana generátoru .....	39
5.2	Ochrany ARION WL12 .....	40
5.3	Ochrany VIP300LL .....	41
5.3.1	Vlastní nastavení ochran .....	41
5.4	Ochrana REF610 .....	42
5.4.1	Ochrana REF610_1 .....	43
5.4.2	Ochrana REF610_2 .....	44
5.4.3	Ochrana REF610_3 .....	44
5.5	Selektivita ochran .....	45
Závěr .....		46
Seznam použité literatury .....		47
Seznam obrázků .....		49
Seznam tabulek .....		50

## Úvod

V oblastech uhelných revírů se během přirozených geologických procesů tvoří důlní plyny. V určitých lokalitách geologické okolnosti způsobily, že plyn nemohl unikat nepropustnými nadložními vrstvami a zůstával v ložisku. Proto bylo rozhodnuto o vybudování zdroje, který tento pomalu se hromadící důlní plyn bude co nejlépe využívat pro výrobu elektrické energie.

Jako zdroj elektrické energie byla vybrána kogenerační jednotka na bázi spalovacího motoru. Konkrétně spalovací motor DEUTZ TCG 2020 V16 pohánějící synchronní generátor MJB 500 MC 4 o celkovém výkonu 1930 kVA. Tato jednotka umožňuje využití paliva jak k výrobě elektrické energie, tak dokáže využít odpadního tepla, které se může dále zužitkovat (vyšší účinnost zdroje), nebo rozptýlit do okolí (s menší účinností). Výhody i nevýhody kogeneračních jednotek a jednotlivé typy jsou popsány v prvních dvou kapitolách.

Postupem času se rozhodlo, s ohledem k dostatku důlního plynu a dostatečnému finančnímu profitu, připojit dvě nové jednotky o stejných parametrech. Tato skutečnost sebou nesla nutnost přeprojektování celé rozvodny; konkrétně přidání nových polí hlavní rozvodny VN, výměnu transformátorů na hladině 22/6,3 kV a další změny. Všechny tyto zásahy musí být provedeny s ohledem na možný výskyt poruch v elektrickém rozvodu, kterým se nedá nikdy na 100 % zabránit. Nejčastější poruchou v rozvodu elektrické energie je zkrat, který je pro rozvody také nejnebezpečnější. Problematika zkratových jevů je nastíněna v kapitole 3.

Podrobnějším výpočtem zkratových jevů výše popsaného rozvodu se zabývá kapitola 5, kde je uveden výpočet zkratových poměrů. Dále je proveden návrh kabelového vedení s ohledem na tepelné namáhání při zkratových proudech. Tomuto namáhání musí odolat nejen vodiče ale všechno instalované zařízení, kterým může procházet zkratový proud.

Vzhledem k nemožnosti stoprocentního zabránění zkratových jevů, je důležité tyto poruchy detekovat a vypnout je v nejkratším možném čase, avšak zároveň odpojit pouze postiženou část obvodu. Touto problematikou se zabývá kapitola 5, kde je popsán výběr, umístění a nastavení ochran jednotlivých úseků rozvodu.

# 1. Energetický přínos kogenerace

V dnešní době jsou kladeny vysoké požadavky na dodávku velkého množství elektrické energie a tepla, jak pro průmyslové tak i pro domácí využití, a tyto požadavky se s rozvojem městských aglomerací a průmyslových závodů neustále zvyšují. Je nutné hledat nové zdroje těchto komodit nebo možnosti jejich levné a vysoce účinné výroby, přepravy a transformace.

Z tohoto důvodu se v dnešní době rozmáhá využívání zdrojů kombinované výroby elektrické energie a tepla. A to buď výstavbou nových zařízení v plánovaném místě spotřeby nebo rekonstruováním starých zařízení se snahou zvýšit využitelnost jednotlivých energií za účelem minimalizace ztrát a s ohledem k aktuálnímu požadavku spotřebitele.

## 1.1 Kogenerace

Pod pojmem kogenerace, u nás známější spíše jako teplárenská výroba, v některé odborné literatuře označena také jako kombinovaná výroba elektřiny a tepla (KVET), se rozumí společná výroba elektrické energie a tepla. Potřeby elektrické energie a užitého tepla v moderní době jsou neoddiskutovatelné. Obě formy energie lze vyrábět buď odděleně, potom je zpravidla výroba elektrické energie zatížena značnými energetickými ztrátami, anebo za vhodných podmínek i sdruženě (kombinovaně), kdy lze efektivně využít menší či větší část odpadního tepla z výroby elektřiny.[3]

Jednotky většího výkonu s parní nebo plynovou turbínou jsou označovány jako Teplárny, pod pojmem kogenerační jednotky se rozumí převážně jednotky menšího výkonu se spalovacími motory.

Pro tyto jednotky jsou definováni základní ukazatelé:

### 1.1.1 Teplárenský modul

Je definován jako podíl vyrobené elektrické energie k výrobě užitečného tepla v zařízení KVET za určité časové období. Hodnoty  $\sigma$  jsou dány konstrukcí a typem Kogenerační jednotky, ovlivňovány jsou jak způsobem provozu, tak i parametry odebíraného tepla. (Při změně zatížení se mění poměr okamžitého elektrického a tepelného výkonu a tím přímo úměrně mění maximální možná dodávka tepla nebo elektrické energie). [1]

$$\sigma = \frac{E_{KVET}}{Q_{KVET}} [-] \quad (1)$$

Kde:

$\sigma$	teplárenský modul
$E_{KVET}$	elektrická energie vyrobena v procesu KVET [GJ, MWh]
$Q_{KVET}$	teplo vyrobené v procesu KVET [GJ, MWh]

#### Poznámka:

Název „teplárenský modul“ a symbol „ $\sigma$ “ jsou tradiční název a tradiční symbol používané v české odborné literatuře. Současná česká legislativa používá namísto názvu teplárenský modul výraz „směrné číslo vyjadřující poměr výroby elektřiny v zařízení KVET“ a namísto symbolu  $\sigma$  symbol „y“. Současná evropská legislativa používá název „poměr vyrábění elektřiny a tepla v procesu KVET“ a symbol „C“. Manuál pro určení KVET dle CEN/CENELEC používá název „poměr elektřiny k teple“ a symbol „ $\sigma_{CHP}$ “.

## 1.1.2 Účinnosti zdrojů KVET

### Elektrická účinnost:

Účinnost výroby elektrické energie ve zdroji KVET představuje podíl elektřiny vyráběné formou KVET ku celkové spotřebě tepla v palivu ve zdroji KVET (tj. tepla v palivu pro výrobu elektřiny i tepla ve zdroji KVET). Vypočte se podle vztahu:

$$\eta^{el}_{KVET} = \frac{E_{KVET}}{Q_{pal-KVET}} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

Kde:

$E_{KVET}$  elektřina vyráběná ve zdroji KVET [GJ, MWh]  
 $Q_{pal-KVET}$  spotřeba tepla v palivu ve zdroji KVET [GJ, MWh]

### Tepelná účinnost:

Účinnost výroby užitečného tepla ve zdroji KVET představuje podíl užitečného tepla vyráběného formou KVET ku celkové spotřebě tepla v palivu ve zdroji KVET (tj. tepla v palivu pro výrobu tepla i elektřiny ve zdroji KVET). Vypočte se podle vztahu:

$$\eta^q_{KVET} = \frac{Q_{už-KVET}}{Q_{pal-KVET}} \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

Kde:

$E_{KVET}$  elektřina vyráběná ve zdroji KVET [GJ, MWh]  
 $Q_{pal-KVET}$  spotřeba tepla v palivu ve zdroji KVET [GJ, MWh]

### Celková účinnost:

Celková účinnost zdroje KVET představuje podíl celkové elektřiny a užitečného tepla vyráběného formou KVET ku celkové spotřebě tepla v palivu ve zdroji KVET. Vypočte se podle vztahu:

$$\eta^{celk}_{KVET} = \frac{E_{KVET} + Q_{už-KVET}}{Q_{pal-KVET}} \cdot 100 = \eta^{el}_{KVET} + \eta^q_{KVET} [\%] \quad (4)$$

Tab. 1.1.2–1 Porovnání kogeneračních zařízení [2]

Kogenerační zařízení	$\sigma$	$\eta^{el}$	$\eta^q$	$\eta^{celk}$	výkon (kW <sub>el</sub> )
s nízkými parametry páry	0,07 až 0,13	5 až 10	75	80 až 85	do 100
s vysokými parametry páry	0,5 až 0,8	30 až 40	50 až 55	85 až 90	od 10 000
s plynovou turbínou *)	0,5 až 1	25 až 41	50 až 40	75 až 81	od 500
s paroplynnou jednotkou	0,9 až 1,3	42 až 50	40 až 45	87 až 90	od 20 000
se spalovacím motorem **)	0,5 až 1	27 až 45	45 až 53	80 až 90	7 až 5 000
s parním strojem	do 0,2				do 70
s palivovými články	1,3 až 2	50 až 60	30 až 37	87 až 90	

\*) platí pro PT s výkonem pod 1 MW

\*\*) platí pro motory 20 kW až 5 MW

## 1.2 Přínos oproti klasickým elektrárnám a teplárnám

### 1.2.1 Energetický přínos

Velký a nejpodstatnější přínos kogeneračních zařízení oproti oddělené výrobě elektrické energie a tepla je vysoká účinnost při výrobě elektrické i tepelné energie. Tím se výrazně sníží spotřeba primárních energetických zdrojů. Tuto skutečnost můžeme demonstrovat na modelovém příkladu.

Předpokládáme účinnost výroby elektřiny, vč. ztrát v rozvodech k místu spotřebitele, 35%, účinnost výtopny 90%. Pro ilustrační výpočet uvažujme dodávku 1 GJ tepla spotřebiteli a současně také 0,5 MWh elektrické energie. Při výrobě 0,5 MWh elektřiny spotřebuje kondenzační elektrárna 5,14 GJ tepla z paliva, z čehož 3,34 GJ se odvede do okolí jako ztráta (větší část z toho chladicími věžemi). Výtopna při dodávce 1 GJ tepla spotřebuje v palivu 1,11 GJ, z toho je 0,11 GJ odvedeno do okolí jako ztráta (většinou komínem).

Při kogeneračním způsobu se 1 GJ tepla a 0,5 MWh elektřiny vyrobí v jediném zařízení. Pro tento příklad předpokládejme jako kogenerační zařízení spalovací turbínu s kotlem na odpadní teplo, která při celkové účinnosti 90% při výrobě 1 GJ tepla vyrobí právě 0,5 MWh elektrické energie. V palivu přitom spotřebuje 3,11 GJ tepla, z čehož 0,311 GJ se odvede do okolí jako ztráta (převážně výfukovými spalinami).

Tab. 1.2.1–1 Modelový příklad energetického přínosu kogenerační jednotky

-	Jednotka	Kondenzační elektrárna	Výtopna	Kogenerační zařízení
Dodávka tepla	(GJ)	-	1	1
Dodávka el. Energie	(MWh)	0,5	-	0,5
Účinnost	(-)	0,35	0,9	0,9
Spotřeba paliva	(GJ)	5,14	1,11	3,11
Ztráty	(GJ)	3,34	0,11	0,31
Spotřeba paliva	(GJ)	6,25		3,11
Uspora paliva	(%)	0		49,75

Jak je možné vidět v Tab. 1-2 celková úspora paliva pro modelový případ je 49,75%

### 1.2.2 Ekologický přínos

S vysokou účinností kogeneračních zařízení je spojena značná úspora primárních paliv, jak je patrné z modelového případu, viz předchozí bod. Úspora paliva je pro modelový případ téměř 50%, to znamená, že v tomto případě je poloviční i množství vyprodukovaných škodlivých látek jako je SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, prachu. V závislosti na okolnostech je snížení emisí oxidu uhličitého při provozu kogenerační jednotky rozdílné, v závislosti na použité technologii a dosažené hodnotě modulu teplárenské výroby elektřiny.

### **1.3 Nevýhody kogeneračních jednotek**

K hlavním nevýhodám kogeneračních jednotek patří paradoxně neoddělitelná výroba elektrické energie a tepla. V případě jednotek, které nemají konstantní odběr tepelné energie po celý rok, (která je využívána k vytápění rodinných domů a jiných objektů, popřípadě ohřevu užitkové vody), je nadbytečné teplo odvedeno přes chladiče do okolí. Tím rapidně klesá celková účinnost kogenerační jednotky, její teplotní modul a je smazána výhoda oproti oddělené výrobě elektrické energie a tepla. Tento fakt lze ze značné části odstranit použitím trigenerační jednotky, která nevyužitě teplo může využít na výrobu chladu.

Další nevýhodou je samotná cena kogenerační jednotky, která v případě velkých zařízení s výkonem okolo 500 kWe vychází na cca 750 €/kWe, u jednotek s výkonem 50 kWe je to 1200 €/kWe a u jednotek s výkonem 5 kWe přes 3000 €/kWe. Z toho důvodu nejsou kogenerační jednotky malých výkonů atraktivní jak pro zákazníky, tak pro výrobce.

### **1.4 Využití kogeneračních jednotek v praxi**

#### **1.4.1 Teplárenská výroba**

Kogenerační jednotky disponují velmi širokým výkonovým rozsahem počínaje několika MW pro zásobování panelových domů, popřípadě sídlišť, až po mnoho desítek MW ve velkých městských aglomeracích. Teplárny fungují po celou dobu otopné sezóny (220-250 dnů v roce), v ČR poměrně rozšířený zdroj, který využívá hnědého nebo černého energetického uhlí, popřípadě zemního plynu. V dnešní době podíl zemního plynu pomalu ale trvale roste. Nejčastěji využívané turbíny jsou protitlaké nebo odběrové viz. kap. 2.1., u plynofikovaných zdrojů tepla se nejvíce využívají spalovací motory, spalovací turbíny a pro největší výkony paroplynová zařízení. Pro spalovací turbíny je vhodné zbudovat akumulátor tepla pro možnost využití pružnosti tohoto zdroje. Nové tepelné zdroje se pro tento účel nebudují. V současné době se nebudují velká sídliště a přiklání se spíše k decentralizované zásobování teplem.[1]

#### **1.4.2 Kondenzační elektrárny s možností dodávky tepla**

Lze využít pouze u kondenzačních elektráren, které jsou v blízkosti velkého spotřebitele tepla, jak k ohřevu užitkové vody, tak pro průmyslové využití. Do této podoby byla upravena většina kondenzačních elektráren, nejstarší prošly razantní změnou a to výměnou kondenzačních turbín za kogenerační parní turbíny protitlaké a odběrové (např. elektrárna Opatovice dodává teplo v podobě horké páry do Hradce Králové a Pardubic). Tepelný výkon v tomto provedení přesahuje 3000 MW kvůli malým měrným nákladům na rekonstrukci vlastních elektráren. Nejnákladnější je zbudování nových dálkových horkovodů, které jsou jediným omezujícím faktorem. [1]

#### **1.4.3 Průmyslové využití**

##### **Chemický průmysl**

Chemické závody jsou velkým odběratelem tepla v podobě páry na více tlakových hladinách, často o velmi vysokém tlaku. Jejich provoz bývá nepřetržitý s velmi malými výkyvy v odběrech během dne. I v letním období dochází jen k malému poklesu odběru tepla. Z pohledu odběrů elektrické energie se jedná o střední až velké odběratele s prakticky neměnnou spotřebou během celého roku. Z těchto důvodů se jedná o velmi příznivé prostředí pro provoz zdrojů KVET. Jako nejvýhodnější zdroje KVET pro chemický průmysl vychází spalovací turbína popřípadě paroplynová zařízení. [1]

## **Strojírenský průmysl**

Vyznačuje se velkou spotřebou elektrické energie, teplo je v tomto případě upozaděno a využívá se převážně na vlastní vytápění podniku a ohřev teplé užitkové vody. Využití zdrojů KVET je s ohledem na převážně jednosměnný provoz a celkovou dobu využití méně výhodné. Nejvýhodnější se jeví jednotky se spalovacími motory pro ohřev teplé užitkové vody. [1]

## **Papírenský průmysl**

Má prakticky obdobné požadavky jako chemický průmysl. Velkou výhodou je možnost využití odpadu při výrobě a to v podobě spalování biomasy. Většina podniků využívá několika protitlakových parních turbín dodávajících páru na několika tlakových hladinách. Výhodné je také použití spalovacích turbín v paroplynovém zapojení. [1]

## **Čistírny odpadních vod**

Jsou ideální pro zřízení kogenerační jednotky se spalovacími motory, popřípadě spalovací turbíny, tato metoda je u nás dlouhodobě využívána. Spalovací motory se využívají ke spalování kalových plynů, které jsou vedlejším produktem technologických procesů při čištění vody. Zbytkové teplo ze spalovacích motorů se využívá k vyhřívání čistírenských kalů. Elektrická energie je využita k pohonu čerpadel, motorů a jiných technologických zařízení využitých při čištění. Tím je dosažena nezávislost nad dodávkou energie ze sítě. Toho využívá převážná část velkých čistíren odpadních vod v ČR. [1]

### **1.4.4 Stavby občanské vybavenosti**

#### **Nemocnice**

Nemocnice patří ke stabilním odběratelům jak elektrické energie, tak tepla po celý rok. Na rozdíl od průmyslových podniků, jejich odběry energií o víkendech ani o svátcích výrazně neklesají. Tento fakt má značný vliv na celkové roční využití zdroje KVET a tímto lze pokrýt vlastní spotřebu. V nemocničním zařízení je výhodné zřídit třígenerační zařízení z důvodu potřeby velkého množství tepelné, elektrické energie a v letních měsících i velké množství chladu. Jednotky KVET v tomto případě mohou sloužit v ostrovním režimu jako nouzový zdroj elektřiny. [1]

#### **Obchodní domy, plovárny a jiná rekreačně sportovní střediska**

Jedná se o podobný případ využití jako v nemocnicích. Tyto objekty mají značnou spotřebu tepla pro vlastní vytápění v zimním období, chlazení v letním období, v případě plováren k ohřevu vody v bazénu, pro sprchy. Elektrická energie je převážně využívána pro osvětlení, pohon čerpadel, saunu, ventilaci. Doba využití u obchodních domů bývá 10-12 hodin a plováren 12-14 hodin denně. [1]

#### **Administrativní budovy, školy, vysokoškolské koleje**

Limitující faktor pro využití kogeneračních jednotek je v případě administrativních budov a škol spotřeba elektrické energie. Největší nevýhodou pro nasazení zdroje KVET je omezení provozu během svátků, víkendů a prázdnin. Z tohoto důvodu je nutná podrobná ekonomická analýza. U vysokoškolských kolejí je tento fakt příznivější, mají vysokou spotřebu tepla i elektrické energie během celého týdne, pokles nastává pouze v období prázdnin. [1]



## 2. Druhy kogeneračních jednotek

V dnešní době se na trhu uplatňuje několik možných způsobů kombinované výroby elektrické energie a tepla lišících se převážně ve způsobu získávání energie pro pohon elektrického alternátoru, který se u většiny jednotek v zásadě neliší. Nejrozšířenější kogenerační zařízení jsou:

- S parní turbínou
- S plynovou turbínou
- S pístovým spalovacím motorem
- Paroplynové cykly

Tab. 2–1 Přehled el. výkonů kombinované výroby [5]

Technologie kombinované výroby	Obvyklý rozsah elektrických výkonů [MWe]
Protitlaká parní turbosoustrojí	3 až 60
Odběrová parní turbosoustrojí	25 až 200
Malá protitlaká (redukční) parní turbosoustrojí	0,2 až 2,5
Samostatné plynové spalovací turbíny	0,2 až 250
Paroplynové cykly	5 až 450
ORC moduly	0,2 až 5
Plynové motory	0,02 až 4,5
Plynové mikroturbíny	0,01 až 0,25
Palivové články	0,005 až 2
Stirlingův motor	0,001 až 0,03

### 2.1 S parní turbínou

Jedná se o nejpoužívanější schéma pro průmyslová kogenerační zařízení, která jsou využívána dlouhá léta, s obvyklým rozsahem elektrických výkonů od jednotek MWe až po stovky MWe. Využití parní turbíny jako zdroje energie pro kogenerační zařízení je možné realizovat dvojím způsobem:

- 1) Protitlakou parní turbínou
- 2) Kondenzační parní turbínou s odběrem páry

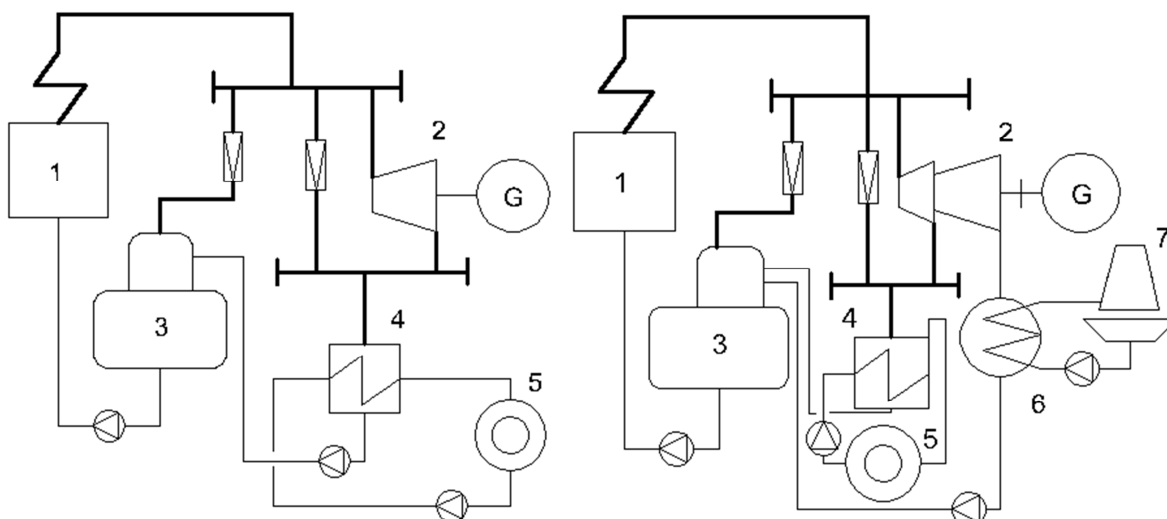
**Protitlaková turbína představuje nejjednodušší možné zapojení, při kterém pára o vysokých parametrech a tlacích vstupující do turbíny a expanzi předá většinu své energie v podobě mechanické energie pro pohon elektrického alternátoru. Při výstupu z turbíny má pára relativně nízký tlak, ale je možné ji dále využít. Výkon turbíny závisí na množství expandující páry a také na požadované kvalitě dodávaného tepla, která je dána tlakem a teplotou páry vystupující z turbíny. Při tomto způsobu je výroba elektřiny závislá na potřebách tepla.**

V případě potřeby páry o konkrétních parametrech je možné využít kondenzační parní turbínu s odběrem páry a ve vhodném místě turbíny vyvést páru s požadovanými parametry. U těchto

turbín jen nesporná výhoda v tom, že množství odebírané páry lze regulovat v rozsahu od nuly (čistě kondenzační režim) až po maximální možné odběrové množství, na které je turbína navržena.

Pro jednotky s parní turbínou je typický malý elektrický výkon vztažený na jednotku dodávaného tepla a vysoké investiční náklady, které jsou dány složitostí uspořádání kotlů a celé tepelné centrály.

V dnešní době se na území ČR postupně rekonstruuje část kondenzačních elektráren v blízkosti velkých městských aglomerací, kvůli zvýšení ekonomické efektivity a využití dříve odpadního tepla k vytápění nebo dalšímu průmyslovému využití.



1 Parní kotel; 2 Parní turbína; 3 Napájecí nádrž;  
4 Ohřívač topné vody; 5 Spotřebič tepla

1 Parní kotel; 2 Parní turbína; 3 Napájecí nádrž;  
4 Ohřívač topné vody; 5 Spotřebič tepla; 6 Kondenzátor;  
7 Chladicí věž

**Obr. 1 Schéma zapojení s protitlakou parní turbíny [1]**

**Obr. 2 Schéma zapojení kondenzační parní turbíny s odběrem páry[1]**

Výhody:

- je použitelné libovolné palivo;
- teplo může být dodáváno v libovolné formě (horká voda, pára VT i NT);
- může být splněno více než jeden požadavek na parametry dodávaného tepla;
- velký rozsah jednotkových výkonů;
- možnost dodávky turbíny s výkonem a parametry dle potřeb investora;
- vysoká celková účinnost kogeneračního zdroje;
- dlouhá životnost.

Nevýhody:

- malý poměr elektrického a tepelného výkonu;
- pomalé najíždění a změna výkonu;
- kogenerační zařízení s parní turbínou je poměrně složité s řadou pomocných provozů;
- poměrně velké požadavky na zastavěnou plochu a obestavěný objem celého kogeneračního zařízení;
- poměrně velké investiční náklady;
- obtížnější realizace úplné automatizace provozu zdroje.

## 2.2 S plynovou turbínou

Spalovací turbína s jednoduchým otevřeným oběhem se skládá z kompresoru, který nasává venkovní vzduch a pomocí kompresoru s relativně vysokým počtem lopatkových řad je stlačován. Stlačený vzduch pokračuje do spalovací komory, kde se v důsledku hoření paliva ohřívá, čímž má zároveň snahu zvětšovat svůj objem. Expanze ohřátého stlačeného vzduchu je umožněna v třetí – expanzní části turbíny, což je opět axiální rotační stroj s několika řadami lopatek, kde se mění energetický potenciál stlačeného vzduchu o vysoké teplotě na mechanickou práci. Tato mechanická práce se zčásti využívá pro pohon již zmiňovaného kompresoru, zčásti pro pohon generátoru. Spaliny vystupující z expanzní části turbíny mají zpravidla ještě dostatečnou teplotu využitelnou pro topné účely, tedy dají se využít přímo (např. pro technologické účely), nebo je lze zavést do kotle, ve kterém je vyráběna pára nebo ohřívána topná voda, což je tzv. rekuperace tepla. V současné době jsou využívány turbíny dvou odlišných konstrukcí, které vyrábí několik předních výrobců. [3]

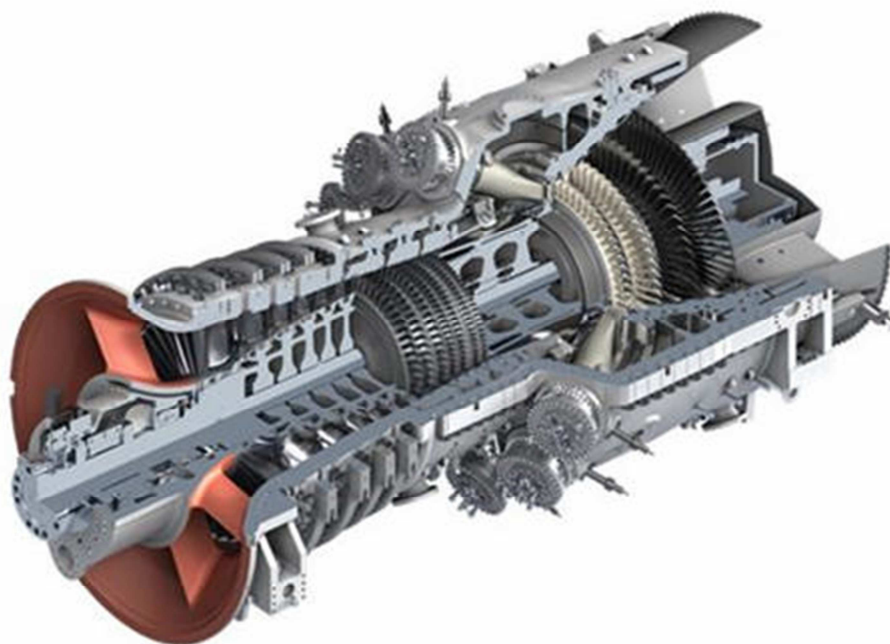
### Spalovací turbíny průmyslového typu:

Vycházejí původně z konstrukce parních turbín. Bývají v jednohřídelovém provedení, kdy na jednom hřídeli je umístěna kompresorová i expanzní část turbíny (není podmínkou), generátor může být poháněn buď přímo přes spojku rotorem turbíny (u větších plynových turbín) nebo přes převodovku (u menších vysokootáčkových strojů). Mají velký výkonový rozsah od jednotek MW až po stovky MW.

### Spalovací turbíny odvozené z leteckých proudových motorů:

Jedná se o proudový letecký motor doplněný o plynovou turbínu napojenou na elektrický generátor. Využívá odlehčené konstrukce, která bývá dvou někdy i tříhřídelová. V principu se tedy jedná o proudový motor známý například z letadel, kde však reaktivní proud vystupujících spalin je v dalších stupních expanzní turbíny transformován na mechanickou práci (elektrickou energii) a užité teplo. [1,3]

Plynové turbíny se vyrábějí ve velmi širokém výkonovém rozsahu od stovek kW (menší jednotky s výkonem několik desítek kW se nazývají mikroturbíny) až po jednotkový výkon přes 200 MW.



**Obr. 3 Plynová turbína Siemens SGT5-8000H s výkonem 375 MW při účinnosti 40 %, 570 MW při kombinovaném cyklu s účinností přesahující 60 % [13]**

#### Výhody:

- vysoká spolehlivost dovolující dlouhý provoz bez nutnosti provozních odstávek;
- dostupnost vysokopotenciálního tepla, umožňující dodávku tepla ve všech požadovaných formách;
- rychlé najíždění a změna výkonu;
- možnost každodenního odstavování;
- při daném výkonu malá hmotnost a rozměry (na zastavěnou plochu a obestavěný prostor);
- malá spotřeba vody;
- nízké měrné investiční náklady;
- dobrá možnost automatizace provozu vedoucí až k bezobslužnému provozu;
- malé požadavky na chladicí nebo přídavnou vodu.

#### Nevýhody:

- vyžaduje relativně kvalitní a čisté palivo (nejlépe zemní plyn nebo lehká kapalná paliva);
- v případě spalování plynu je požadován jeho vysoký tlak nebo výstavba zvláštní plynové kompresorové stanice;
- vysoká hluková hladina, zejména zvuku o vysokém kmitočtu;
- nižší účinnost při nízkých zatíženích a vyšších teplotách okolí;
- nižší účinnost ve srovnání se spalovacími motory;
- při malých jednotkových výkonech nižší účinnost a větší měrné investiční náklady.

## 2.3 S pístovým spalovacím motorem

Celá konstrukce kogeneračních jednotek se spalovacími motory je velmi jednoduchá, skládá se ze spalovacího motoru, který pohání elektrický generátor připojený spojkou a hřídelí. Jako generátor je u malých jednotek využíván asynchronní motor, pro větší jednotky pak synchronní generátory čtyřpólové (1500 ot/min) nebo šestipólové (1000 ot/min).

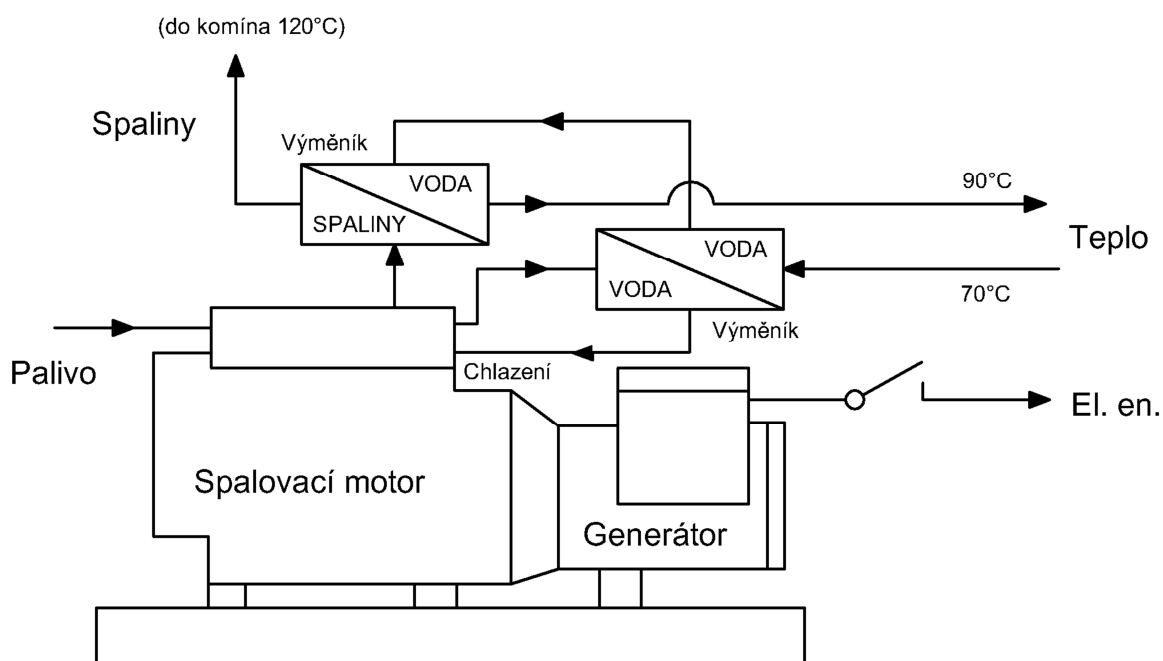
Spalovací motory jsou klasické pístové motory s vnitřním spalováním (vidlicové, trakční nebo lodní) lišící se ve způsobu zapálení směsi paliva a vzduchu (vznětové nebo zážehové). Tyto spalovací motory musí projít nezbytnou rekonstrukcí palivového systému pro spalování zemního plynu nebo jiného plynného paliva, pro které má být motor využit.

### Vznětové motory:

U vznětových motorů (označovaných u nás poněkud nepřesně jako dieselové nebo naftové) dochází k zapálení paliva ve válci samovznícením při vstřiku do horkého stlačeného vzduchu. Účinnost těchto motorů na hřídeli je v rozpětí 35% až 45% a jejich jednotkový výkon může dosáhnout až 25 MW.

### Zážehové motory:

Zážehové motory se vyznačují zapalováním směsi paliv a vzduchu elektrickou jiskrou. Spojkovou účinnost mají nižší než je účinnost vznětových motorů a to mezi 27% a 43%, a také jejich výkonové rozpětí je menší. Nové zážehové motory s výkonem nad 3 MW užívají předkomůrku, v níž má směs stechiometrické složení. Motory s předkomůrkou mají účinnost až 43%, obdobně jako velké vznětové motory.



Obr. 4 Kogenerační jednotka s pístovým motorem [14]

Již ze samotné podstaty spalovacího motoru se směs paliva a vzduchu smísí ve válci a „explodují“, tím předají svou energii válci. Při tomto procesu vznikají velmi vysoké teploty, které jsou pro motor od určité meze nežádoucí (nad pracovní teplotou), a je nutné přídavné chlazení. Při kogeneraci není toto teplo odvedeno chladičem do okolního vzduchu, ale je dále využíváno, jak je

možné vidět na Obr. 4. Ve zvláštním výměníku může výstupní teplota topné vody dosahovat 100 až 110 °C v případě tlakového primárního okruhu. Výhodnější je požadovat ohřátí teplé vody jen na 90 až 100 °C. Takto získané teplo lze ještě zvýšit využitím tepla spalin výfukových plynů, jejichž teplota bývá 400 až 540 °C. Tím je možno ohřívat tlakovou vodu na více než 110 °C (omezení je dáno tlakem v okruhu ohřívané vody). Chlazení oleje je prováděno ve speciálním vodním okruhu a to nejvýše na teplotu kolem 80 °C.

Příklady využití tepelné energie spalovacích motorů:

- ohřev sekundární otopné vody s nejobvyklejšími teplotami topné a vratné vody, tj. 90/70 °C;
- práce v moderních primárních tepelných sítích s nízkými teplotami topné vody a kvantitativní regulací;
- ohřev primární vody na teploty 110 až 130 °C;
- výroba páry o nižším tlaku;
- přehřev napájecí vody parních kotlů a současně ohřev okysličovacího média hořáků těchto kotlů;
- kombinace přímého sušení výfukovými spalinami a ohřev topné vody teplem chlazení motoru;
- chladicí zařízení;
- výroba páry vyššího tlaku spojena se zařazením protitlakové parní turbíny (paroplynové zapojení).

Tab. 2.3–1 Přehled typických parametrů kogeneračních jednotek se spalovacími motory [3]

Elektrický výkon jednotky (rozsah)	kWe	10-100	100-1000	1000-5000
Tepelný výkon jednotky	kWt	20-170	170-1500	1400-5500
Účinnost výroby el. energie	%	27-32	33-36	37-41
Účinnost výroby tepla	%	48-57	46-54	45-52
Celková účinnost jednotky	%	80-84	82-87	86-89
Teplárenský modul	-	0,5-0,59	0,59-0,67	0,71-0,91

Výhody:

- Možnost rychlého njetí a odstávky
- Vysoká účinnost i u výkonově relativně malých jednotek
- Modulové uspořádání a jednoduchá instalace, malé prostorové nároky

Nevýhody:

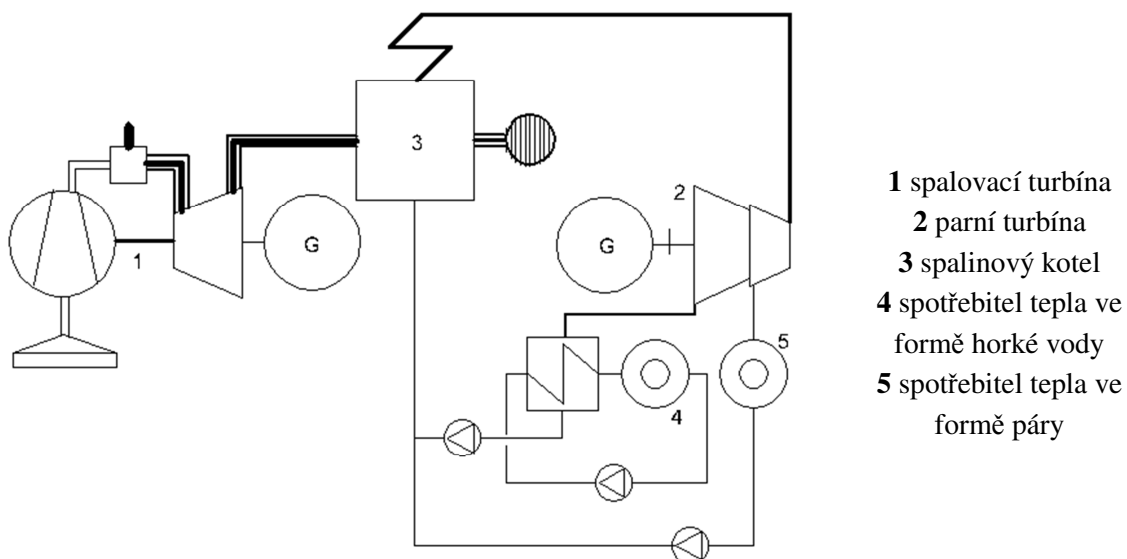
- Možnost spalování pouze ušlechtilých paliv
- Hlučnost a vibrace, nezbytnost pružného uložení a protihlukové ochrany
- Vysoká celková účinnost pouze při dodávkách tepla ve formě teplé vody

## 2.4 Paroplynová zařízení

Jedná se o jeden z nejsložitějších technologických komplexů pro výrobu jak elektrické energie, tak kombinovanou výrobu elektrické energie a tepla. Spojuje v sobě celkem tři technologické celky plynovou turbínu (Obr. 5) nebo spalovací plynový motor (Obr. 6), parní kotel na výrobu páry pro parní turbínu a elektrický generátor. Účinnost nejdokonalejších paroplynových jednotek používaných v elektrárnách v dnešní době přesahuje 60 %. Obdobné účinnosti se dosahuje u kogeneračních jednotek využívající stejný princip viz. Tab. 5.

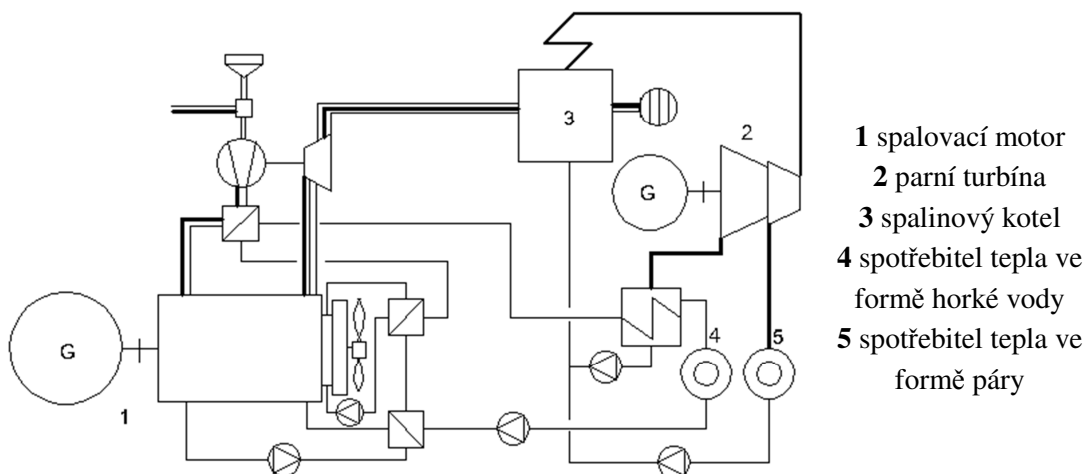
Tab. 2.4–1 Běžné účinnosti paroplynového cyklu [3]

Paroplynové cykly	$\eta$	S protitlakovou parní turbínou	S odběrovou parní turbínou	S kondenzační parní turbínou
Účinnost výroby el. energie	%	40-45	46-50	51-53
Účinnost výroby užit. tepla	%	38-46	10-30	-
Celková účinnost PPC	%	83-86	60-76	51-53



Obr. 5 Paroplynová jednotka s plynovou turbínou [1]

Princip činnosti paroplynové jednotky vychází z využití vysokoteplotních odpadních spalin z plynové turbíny Obr. 5 (popřípadě plynového motoru velkého výkonu Obr. 6) v spalínovém kotli. Tyto kotle bývají vícetlakové, pro maximalizaci vychlazení spalin a docílení maximální účinnosti. Tyto kotle nejsou konstrukčně stejné jako klasické parní kotle, díky potřebě větších teplosměrných ploch. Ani za těchto podmínek nejsou schopny vyrobit páru srovnatelných parametrů. Tato pára pohání zpravidla vícestupňovou kondenzační turbínu, protitlakou, odběrovou protitlakou, popřípadě kondenzační turbínu s odběry páry bez regeneračního ohřevu. Teplo pro spotřebitele může být dodáváno z parního okruhu v libovolné formě. [1,3]



Obr. 6 Paroplynová jednotka se spalovacím motorem [1]

Výhody:

- Vysoký podíl vyráběné elektrické energie
- Vysoká účinnost výroby elektřiny i celého cyklu v případě provedení bez kondenzace
- Možnosti dodávky tepla v páře i v horké vodě

Nevýhody:

- Možnost spalování pouze ušlechtilých paliv
- Vyžaduje kontinuální provoz bez častých odstávek, omezená provozní pružnost
- Technologická komplikovanost, vysoké nároky na kvalitu obsluhy a údržby

## 2.5 Ostatní

### S parním strojem

Parní stroje mohou najít své uplatnění v případech, kdy jeden zdroj, např. středotlaký parní kotel, vyrábí současně páru pro dvě tlakově a teplotně rozdílné úrovně užití, tj. část vyráběné „průmyslové“ páry je redukována na páru „topnou“.

### Mikroturbíny

Mikroturbíny jsou vysokootáčkové (70000-96000 ot/min) plynové turbíny o elektrickém výkonu od 10 do 100 kW. Základní výhodou mikroturbín je kompaktnost, nízká hmotnost, vysoká provozní flexibilita a spolehlivost, stejně tak i možnost rychlých a četných startů či provoz při částečném výkonu.

### Stirlingův motor

Jedná se o motor s vnějším spalováním. Skládá se z dvou trvale propojených zdvihových prostor s rozdílnou teplotou pracujících s uzavřeným oběhem látky. Obvykle se jedná o inertní plyn, který je střídavě ohříván a ochlazován.

### Trigenerace

Trigenerace je kombinovaná výroba elektřiny, tepla a chladu. Spojuje kogenerační jednotku a chladicí jednotku absorpčního typu. Toto spojení umožňuje využít teplo kogenerační jednotky i v letním období, kdy jinak spotřeba tepla klesá na minimum. Tím výrazně prodlužuje dobu provozu kogenerační jednotky a zlepšuje její ekonomické ukazatele.



### 3. Zkratky v elektrických sítích

#### 3.1 Příčiny zkratů

##### Cizí zásahy:

Nejčastější příčinou zkratů je poškození elektrických zařízení cizími zásahy. Například překopnutím či přetržením kabelových rozvodů v zemi při výkopových pracích nebo jiných úpravách terénu těžkou technikou, působení hlodavců na pláště kabelů.

U venkovních vedení jsou způsobeny především povětrnostními a přírodními vlivy (pády stromů a větví, dotykem větví vedení při větru).

##### Vady a nedokonalosti zařízení:

Častou příčinou vzniku zkratů jsou vady elektrických zařízení nebo jejich nedokonalosti. Bývá to především špatná izolace kabelů způsobená špatnou výrobou nebo vlivem stárnutí a tím snížením izolační schopnosti.

##### Přepětí:

Atmosférická přepětí vznikají na venkovních vedeních elektrickou indukcí při výbojích mimo vedení nebo přímým zásahem blesku do vedení. Bouřková přepětí trvají krátkou dobu (do 100  $\mu$ s), mohou však při přímých úderech blesku do vedení dosáhnout kritických hodnot, kterým izolace nedokáže odolat.

##### Chybná manipulací (selhání lidského činitele):

K chybné manipulaci dochází nejčastěji v různých (zvláště složitých) elektrických zařízeních, například vypnutím přípojnicového odpojovače při zatížení. Odpojovačem lze odepínat jen určité malé proudy.

##### Nedostatečná zkratová odolnost zařízení:

Vyskytuje se u starších, nerekonstruovaných zařízení v soustavách s prudkým nárůstem hodnot zkratových proudů. V důsledku částečného poškození zařízení při zkratu pak dochází k následným poruchám.

#### 3.2 Typy zkratů vznikající při poruchách

##### 3.2.1 Nesouměrný zkrat

Nesouměrnými zkraty je nazýváme proto, že proudy tekoucí jednotlivými fázemi působí na soustavu nesouměrně, všechny fáze nejsou zatíženy souměrně.

Jednofázový zkrat: Nastane v soustavě s uzemněným uzlem popř. vyvedeným středním vodičem při spojení jedné z fází se zemí nebo středním vodičem. Způsobuje největší rušení sdělovacích vedení.

Dvojfázový zkrat: Nastane při spojení kterýchkoli dvou fází trojfázové soustavy se zemí.

Dvojfázový zemní zkrat: Nastane, jsou-li dvě spojené fáze současně spojeny se zemí.

Simultánní zkrat: Jedná se o zvláštní případ dvojfázového zkratu, vzniklý spojením dvou různých fází trojfázové soustavy na dvou různých místech.

### 3.2.2 Souměrný zkrat

Souměrný (trojfázový zkrat) vzniká náhodným nebo úmyslným spojením všech tří fází do krátka, popřípadě se zemí. Všechny vodiče jsou postiženy stejně a teče jimi stejný zkratový proud.

## 3.3 Rovnice pro výpočet počátečního rázového zkratového proudu

### 3.3.1 Trojfázový zkrat

V obecném případě se počítá dle rovnice (5) z napětí ekvivalentního napěťového zdroje  $cU_n/\sqrt{3}$  v místě zkratu a zkratové impedance  $\underline{Z}_k = R_k + jX_k$ . Součinitel ekvivalentního napěťového zdroje  $c$ , se vezme z normy ČSN EN 60909-0.

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (5)$$

### 3.3.2 Dvofázový zkrat

Počáteční rázový zkratový proud pro dvofázový zkrat se musí počítat následovně:

$$I_{k2}'' = \frac{cU_n}{|\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}|} = \frac{cU_n}{2|\underline{Z}_{(1)}|} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_k'' \quad (6)$$

V počátečním období zkratu je sousledná impedance přibližně rovna zpětné impedanci nezávisle na tom, zda se jedná o zkrat blízký nebo vzdálený. Lze v rovnici (29) zavést, že  $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$ .

V případě blízkého zkratu se může zkratová impedance  $\underline{Z}_{(2)}$  lišit od  $\underline{Z}_{(1)}$ .

### 3.3.3 Jednofázový zkrat

Počáteční rázový zkratový proud se vypočítá při jednofázovém zkratu následovně:

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3}cU_n}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}} \quad (7)$$

## 3.4 Následky zkratových proudů

Působení zkratových proudů je krátkodobé, ale vzhledem k velikostem zkratových proudů mohou být jejich účinky nebezpečné nejen pro samotná zařízení ale i pro obsluhu. Mezi nejvýraznější účinky patří:

### 3.4.1 Tepelné účinky

Průchodem zkratového proudu zkratovým obvodem v každém časovém okamžiku  $dt$  v něm vznikají tepelné ztráty  $dQ = RI^2dt$ . Toto teplo můžeme rozdělit na dvě složky. První složka tepla se odvede ochlazením do okolí, druhá složka tepla zůstává v tělese a zvyšuje tím jeho teplotu. Při průchodu zkratového proudu můžeme, vzhledem k jeho krátkému působení, zanedbat odvod tepla do okolí a uvažovat, že všechno teplo se akumuluje ve vodiči a zvyšuje jeho teplotu. Minimální průřez vodiče, který nepřekročí maximální hodnotu oteplení, se vypočte:

$$S_{min} = \frac{I_{th} \cdot \sqrt{t_k}}{k} \quad (8)$$

$$k = \sqrt{\frac{(\vartheta_f + 20) \cdot c_0}{\rho_{20}} \cdot \ln \frac{\vartheta_f + \vartheta_k}{\vartheta_f + \vartheta_1}} \quad (9)$$

Kde:

$S_{min}$	je	minimální průřez vodiče v mm <sup>2</sup>
$I_{th}$		ekvivalentní oteplovací proud
$t_k$		doba trvání zkratu
$k$		koeficient respektující teplotu před zkratem a po zkratu a fyzikální vlastnosti vodiče
$\vartheta_f$		fiktivní teplota vodiče dle materiálu
$c_0$		specifické teplo pro 0 °C
$\rho_{20}$		specifický odpor při 20 °C
$\vartheta_1$		teplota vodiče před zkratem (provozní)
$\vartheta_k$		maximální dovolená teplota vodiče při zkratu

### 3.4.2 Dynamické účinky

Příčinou vzniku elektrodynamických sil v elektrických zařízeních je existence magnetických polí. Tato pole vznikají průchodem elektrického proudu vodičem, tím vzniká síla, která způsobuje mechanické namáhání. Velikost působící síly je přímo úměrná velikosti procházejícího proudu. Největší silový ráz je způsoben první amplitudou zkratového proudu tzn. *Nárazovým zkratovým proudem*  $i_p$ . [3, 6]

V nezauzlených sítích tento nárazový zkratový proud vypočteme dle:

$$i_p = \sqrt{2} \cdot \kappa \cdot I_k'' \quad (10)$$

Součinitel  $\kappa$  lze odečíst z obrázku 15 normy ČSN EN 60909-0 dle poměru  $R/X$  nebo  $X/R$ , nebo vypočítat dle rovnice (11):

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} \quad (11)$$

Rovnice (10) a (11) předpokládají, že zkrat vznikne při průchodu napětí nulou a že  $i_p$  se dosáhne přibližně po polovině prvního cyklu. Pro synchronní generátory se použije  $R_G$ .

V případě dvoufázového zkratu:

$$i_{p2} = \sqrt{2} \cdot \kappa \cdot I_{k2}'' \quad (12)$$

Pro zjednodušení je dovoleno použít stejný součinitel  $\kappa$  jako pro trojfázový zkrat. Pokud  $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$ , tak je v tomto případě nárazový zkratový proud  $i_{p2}$  menší než v případě trojfázového nárazového zkratového proudu  $i_p$ , poté můžeme počítat:

$$i_{p2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_p \quad (13)$$



## 4.2 Legenda značení tabulek

Pro větší přehlednost v tabulkách je zavedeno následující barevné značení viz Tab. 4.2-2.

Tab. 4.2–1 Legenda tabulek

Dané parametry použity ve výpočtu (dané normou nebo jiným zdrojem)	Hodnota mezi výpočtu (nutná pro vyčíslení výsledku)	Výsledná hodnota, se kterou se počítá v následujících krocích
R (Ω)	I (A)	P (W)
1	5	<b>25</b>

Tučně vyznačené hodnoty (výsledky) v tabulkách označují, pro které hodnoty je vyčíslen příklad výpočtu.

$$P = R \cdot I^2 = 1 \cdot 5^2 = \mathbf{25\,W}$$

### 4.3 Předběžný návrh kabelů 6 kV

Stávající kogenerační jednotka KGJ1 je na straně VN připojena přímo do hlavního rozvaděče =RVN+RH VN kabelem 3x(10-AXEKVCEY 1x120). Transformátor T1 0,4/6,3 kV se nachází v bezprostřední blízkosti kogenerační jednotky a je napojen silovými kabely 1-CYKY 8x(3x240+120) k synchronnímu generátoru o výkonu 1930 kVA. **Tyto NN kabely nebudou ve výpočtu zkratových poměrů zohledněny.** Vzhledem k jejich délce (max. 10 m) nebudou mít významný vliv na celkový výsledek. (Jejich odpor by byl při délce 10 m  $R = 9,425 \cdot 10^{-5} \Omega$  a induktivní reaktance  $X = 8,286 \cdot 10^{-5} \Omega$ ). Tyto kabely budou ověřeny na maximální dovolený zatěžovací proud a odolnost na tepelné působení zkratového proudu a podíl na celkových elektrických ztrátách. Podrobnější výkres rozvodu je uveden v Příloze jako samostatný výkres.

Nově budované kogenerační jednotky 2 a 3 jsou stejného provedení na straně NN jako KGJ1. Jednotky budou napojeny k hlavnímu rozvaděči =RVN+RH přes podružný rozvaděč =RVN+PR viz Obr. 7 nebo příloha L. Uložení kabelů bude stejné, a to uložení v zemi v ochranné trubce (uložení D1 ČSN 33 2000-5-52 ed.2 Tabulka A.52.3, položka č. 71).

#### Výpočet proudu kabely:

Vychází z výkonu dodávaného synchronním generátorem do sítě.

$$S_n = 1930 \text{ kVA}$$

$$U_n = 400$$

$$\cos \varphi = 0,8$$

Výpočet proudu VN strany transformátoru:

$$P_n = S_n \cdot \cos \varphi = 1930 \cdot 10^3 \cdot 0,8 = 1544 \text{ kW}$$

$$I_1 = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot \cos \varphi} = \frac{1544}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,8} = 2785,72 \text{ A}$$

$$p = \frac{U_2}{U_1} = \frac{6300}{400} = 15,75$$

$$I_2 = \frac{I_1}{p} = \frac{2785,72}{15,75} = 176,87 \text{ A}$$

Proud tekoucí kabely 6,3 kV je roven hodnotě 176,87 A. Kabely budou použity s XPLE izolací. Tomu odpovídá Tabulka B.52.5 normy ČSN 33 2000-5-52 ed.2, kde jsou uvedeny dovolené proudy pro tři zatížené vodiče. Celkový maximální proud vodičem při daném uložení se vypočte dle rovnice (14):

$$I_{max} = I_D \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \quad (14)$$

Kde:  $I_D$  je dovolený proud pro dané uložení  
 $k_1$  součinitel pro okolní teplotu odlišnou od základní (uložení v zemi 20 °C na vzduchu 30°C)  
 $k_2$  přepočítací součinitel uložení  
 $k_3$  počet paralelních vodičů

Maximální hodnoty pro vytypované kabely jsou uvedeny v Tab. 4.3-1. V této tabulce jsou uvedeny i výpočty maximálních dovolených proudů. Kabely, které mají maximální dovolený proud větší než 176,87 A vyhovují a mohou být použity pro výpočet zkratových poměrů. Pro další výpočet byl vybrán Al kabel s průřezem jádra 150 mm<sup>2</sup>. Větší průřez byl zvolen z důvodu zvýšení zkratových poměrů v síti připojením dalších synchronních generátorů.

Tab. 4.3–1 Přehled navrhovaných kabelů

Navrhovaný kabel		Uložení D1					
Izolace XPLE		Dovolený proud vodičem	Přepočítávací koeficienty pro dané uložení			Max. dovolený proud	
Materiál jádra	Průřez jádra (mm <sup>2</sup> )	$I_D$ (A)	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$I_{max}$ (A)	Vyhovuje
Al	95	154	1	1,1	1	169,4	NE
	120	174	1	1,1	1	191,4	ANO
	150	197	1	1,1	1	216,7	ANO
	185	250	1	1,1	1	275	ANO

**Poznámka:**

Konstanta 1,1 teplotního součinitele odporu v Tab. 4.3-1 je vybrána z normy ČSN 33 2000-5-52 ed.2 Tab. B.52.16 odpovídá hodnotě měrného tepelného odporu půdy  $1,5 \text{ K} \cdot \text{m}/\text{W}$

**Celá rozvodná soustava na hladině 6 kV je navržena jako síť IT.**

### 4.3.1 Provozní teploty kabelů

Tyto teploty nesmí za normálního provozu překročit maximální dovolenou provozní teplotu pro daný materiál izolace. Pro kabely s XPLE izolací je tato hodnota  $\vartheta_m = +90^\circ\text{C}$ . Z rozdílu této teploty a teploty uložení (pro uložení v zemi je výchozí teplota  $\vartheta_0 = 20^\circ\text{C}$ ) zjistíme, jaké maximální provozní oteplení  $\Delta\vartheta_m$  je pro daný kabel přípustné.

$$\Delta\vartheta_{max} = \vartheta_{max} - \vartheta_0 = 90 - 20 = \mathbf{70^\circ\text{C}}$$

Pro kabely s XPLE izolací uložených v zemi je maximální přípustné oteplení jádra vodiče  $\Delta\vartheta_m = 70^\circ\text{C}$ .

Provozní oteplení kabelů způsobuje průchod proudem. U holých vodičů roste ztrátový tepelný výkon s druhou mocninou. U vodičů izolovaných je tato závislost ještě větší. V praxi se pro izolované vodiče uvádí mocnitél 2,492 a využíváme rovnice (15), která uvádí jaké provozní oteplení  $\Delta\vartheta_z$  způsobí průchod zatěžovacího proudu  $I_m$ .

$$\Delta\vartheta_z = \Delta\vartheta_{max} \cdot \left(\frac{I_z}{I_{max}}\right)^{2,492} = 70 \cdot \left(\frac{50,65}{216,7}\right)^{2,492} = \mathbf{0,714^\circ\text{C}} \quad (15)$$

Provozní oteplení je pro kabel K1 na hladině 22kV pouze  $\Delta\vartheta_z = 0,714$ . To je dáno tím, že je zatěžován pouze z jedné čtvrtiny svého proudového maxima.

$$\vartheta = \vartheta_0 + \Delta\vartheta_z = 20 + 0,714 = \mathbf{20,714^\circ\text{C}}$$

Pro výpočet ostatních kabelů byla použita stejná metoda. [12]

Tab. 4.3.1-1 Provozní teploty kabelů (K3-K7 S=150 mm<sup>2</sup>)

Kabely VN 22 kV a 6,3 kV									
	Jmenovité napětí	Průřez jádra	Zatěžovací proud	Dovolený proud uložení	Výchozí teplota uložení	Maximální provozní teplota	Dovolené provozní oteplení	Oteplení proudem	Provozní teplota
	$U_n$ (kV)	$S$ (mm <sup>2</sup> )	$I_z$ (A)	$I_D$ (A)	$\vartheta_0$ (°C)	$\vartheta_{max}$ (°C)	$\Delta\vartheta_{max}$ (°C)	$\Delta\vartheta_z$ (°C)	$\vartheta$ (°C)
K1	22	3x240	50,65	319	20	90	<b>70</b>	<b>0,71</b>	<b>20,71</b>
K2	22	3x240	101,3	319	20	90	70	4,01	24,01
K3	6,3	3x150	176,87	216,7	20	90	70	42,2	62,2
K4	6,3	3x150	176,87	216,7	20	90	70	42,2	62,2
K5	6,3	3x150	176,87	216,7	20	90	70	42,2	62,2
K6	6,3	3x150	176,87	216,7	20	90	70	42,2	62,2
K7	6,3	3x150	176,87	216,7	20	90	70	42,2	62,2



### 4.3.2 Určení sousledných impedancí soustavy

Sousledné impedance jsou určeny dle platné normy ČSN EN 60909-1. Impedance jsou počítány ve skutečných hodnotách (tzn. v  $\Omega$ ) a s použitím příslušných korekčních součinitelů nutných pro správný výpočet nárazového zkratového proudu  $I_p$  a ekvivalentního oteplovacího proudu  $I_{th}$ .

**Nadřazená soustava:**

Tab. 4.3.2–1 Parametry nadřazené soustavy pro výpočet zkratových poměrů

Nadřazená soustava							
$U_n$ (kV)	Maximální příspěvek	$S_{max}$ (MVA)	$I_{kmax}''$ (kA)	$c_{max}$	$Z_{Qmax}$ ( $\Omega$ )	$R_{Qmax}$ ( $\Omega$ )	$X_{Qmax}$ ( $\Omega$ )
22		334,2	8,77	1,1	1,593	<b>0,1585</b>	<b>1,585</b>
	Minimální příspěvek	$S_{min}$ (MVA)	$I_{kmin}''$ (kA)	$c_{min}$	$Z_{Qmin}$ ( $\Omega$ )	$R_{Qmin}$ ( $\Omega$ )	$X_{Qmin}$ ( $\Omega$ )
		202,7	5,32	1	2,388	<b>0,2376</b>	<b>2,376</b>

$$Z_{Qmax} = \frac{c_{max} \cdot U_n^2}{S_{kmax}} = \frac{1,1 \cdot 22^2}{334,2} = 1,593 \Omega$$

Pro soustavy oddělené od místa zkratu transformátorem lze při zběžném výpočtu uvažovat  $Z_Q = X_Q$ . V případě, že neznáme žádnou přesnou hodnotu rezistence  $R_Q$  síťového napaječe, je možné počítat:

$$X_{Qmax} = 0,995 \cdot Z_{Qmax} = 0,995 \cdot 1,593 = \mathbf{1,585 \Omega}$$

$$R_{Qmax} = 0,1 \cdot X_{Qmax} = 0,1 \cdot 1,585 = \mathbf{0,1585 \Omega}$$

Pro výpočet minimálních hodnot zkratového proudu platí:

$$Z_{Qmin} = \frac{c_{min} \cdot U_n^2}{S_{kmin}} = \frac{1 \cdot 22^2}{202,7} = 2,388 \Omega$$

$$X_{Qmin} = 0,995 \cdot Z_{Qmin} = 0,995 \cdot 2,388 = \mathbf{2,376 \Omega}$$

$$R_{Qmin} = 0,1 \cdot X_{Qmin} = 0,1 \cdot 2,376 = \mathbf{0,2376 \Omega}$$

**Generátory:**

Tab. 4.3.2–2 Parametry synchronních generátorů pro výpočet zkratových poměrů

Generátory								
	$U_{nG}$ (kV)	$S_{nG}$ (MVA)	$x_d''$ (%)	$X_G''$ ( $\Omega$ )	$R_G$ ( $\Omega$ )	$K_G$ (-)	$X_G''$ ( $\Omega$ )	$R_G$ ( $\Omega$ )
KGJ1	0,4	1,93	12,6	0,01045	0,00157	1,023	<b>0,0107</b>	<b>0,0016</b>
KGJ2	0,4	1,93	12,6	0,01045	0,00157	1,023	0,0107	0,0016
KGJ3	0,4	1,93	12,6	0,01045	0,00157	1,023	0,0107	0,0016

Příklad výpočtu:

$$X_{GKGJ1} = \frac{x_d'' \cdot U_{nG}^2}{100 \cdot S_{nG}} = \frac{12,6 \cdot 0,4^2}{100 \cdot 1,93} = 0,01045 \Omega$$

Pro výpočet rázového zkratového proudu je nutné při výpočtu koeficientu  $\kappa$  zohlednit  $R_G$  (rovnice (16)) synchronních generátorů dle 3.6.1 normy ČSN EN 60909-0. Pro generátory s  $U_{nG} \leq 1000$  V se použije  $R_G = 0,15 \cdot X_d''$ .

$$R_{GKGJ1} = 0,15 \cdot X_{GKGJ1} = 0,15 \cdot 0,01045 = 1,5675 \cdot 10^{-3} (\Omega) \quad (16)$$

Při použití ekvivalentního napětového zdroje  $c \cdot U_n / \sqrt{3}$  místo rázového napětí synchronního generátoru musí být použit korekční součinitel  $K_G$  (17) pro výpočet korigované impedance  $\underline{Z}_{GK}$  (18).

$$K_G = \frac{U_n}{U_{nG}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_{nG}} = \frac{0,4}{0,4} \cdot \frac{1,1}{1 + 0,126 \cdot 0,6} = 1,023 \quad (17)$$

$$\underline{Z}_{GKGJ1} = K_G (R_{GKGJ1} + jX_{GKGJ1}'') = 1,023 \cdot (0,00157 + j0,01045) = \mathbf{0,0016 + j0,0107 \Omega} \quad (18)$$

### Transformátory:

Tab. 4.3.2–3 Parametry transformátorů pro výpočet zkratových poměrů

Transformátory										
	$U_n$ (kV)	$S_{Tn}$ (MVA)	$u_k$ (%)	$\Delta P_k$ (kW)	$Z_T$ ( $\Omega$ )	$Z_T$		$K_T$ (-)	$Z_{Tk}$	
						$R_T$ ( $\Omega$ )	$X_T$ ( $\Omega$ )		$R_{Tk}$ ( $\Omega$ )	$X_{Tk}$ ( $\Omega$ )
T1	22	6,3	7	35	5,3778	0,4268	5,3608	1,003	<b>0,4281</b>	<b>5,3769</b>
T2	22	6,3	7	35	5,3778	0,4268	5,3608	1,003	0,4281	5,3769
T1	6,3	2	6	19,5	1,1907	0,1935	1,1749	1,0092	0,1953	1,1856
T2	6,3	2	6	19,5	1,1907	0,1935	1,1749	1,0092	0,1953	1,1856
T3	6,3	2	6	19,5	1,1907	0,1935	1,1749	1,0092	0,1953	1,1856

### Příklad výpočtu:

$$Z_{T1} = \frac{u_k \cdot U_{nT}^2}{100 \cdot S_{nT}} = \frac{7 \cdot 22^2}{100 \cdot 6,3} = 5,3778 \Omega$$

Pro výpočet počátečního rázového zkratového proudu je možné uvažovat  $X_{(1)} = Z_{(1)}, R_{(1)} = 0$ . U velkých transformátorů lze rezistanci zanedbat, protože poměr  $R_T/X_T$  roste s velikostí transformátoru. Rezistanci zohledňujeme pouze v případech, kdy je počítán nárazový zkratový proud  $i_p$  a to dle rovnice (19). U síťových transformátorů musí být dále zahrnut korekční součinitel dle rovnice (20) [8].

$$R_{T1} = \frac{P_{kRT} \cdot U_{nT}^2}{S_{nT}^2} = \frac{35 \cdot 10^3 \cdot 22 \cdot 10^3}{6,3 \cdot 10^6} = 0,4268 \Omega \quad (19)$$

$$X_{T1} = \sqrt{Z_{T1}^2 - R_{T1}^2} = \sqrt{5,3778^2 - 0,4268^2} = 5,3608 \Omega$$

$$K_{T1} = 0,95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0,6 \cdot \frac{X_{T1}}{\frac{U_{nT1}^2}{S_{nT}}}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot \frac{5,3608}{\frac{(22 \cdot 10^3)^2}{6,3 \cdot 10^3}}} = 1,003 \quad (20)$$

$$\underline{Z}_{T1k} = K_{T1} \cdot (R_{T1} + jX_{T1}) = 1,003 \cdot (0,4268 + j5,3608) = \mathbf{0,428 + j5,3769 \, \Omega}$$

**Kabely:**

Tab. 4.3.2–4 Parametry kabelů pro výpočet zkratových poměrů (K3-K7 S=150 mm<sup>2</sup>)

Kabely								
	$U_n$ (kV)	$l$ (km)	$S$ (mm <sup>2</sup> )	$R_k$ (Ω/km)	$R_{kv}$ (Ω) 20°C	$R_{kv}$ (Ω) 90°C	$X_k$ (Ω/km)	$X_{kv}$ (Ω)
K1	22	0,37	240	0,125	<b>0,0463</b>	<b>0,0585</b>	0,1131	<b>0,0418</b>
K2	22	0,37	240	0,125	0,0463	0,0585	0,1131	0,0418
K3	6,3	0,183	150	0,206	0,0377	0,0476	0,1131	0,0207
K4	6,3	0,183	150	0,206	0,0377	0,0476	0,1131	0,0207
K5	6,3	0,215	150	0,206	0,0443	0,0560	0,1131	0,0243
K6	6,3	0,024	150	0,206	0,0049	0,0062	0,1131	0,0027
K7	6,3	0,055	150	0,206	0,0113	0,0143	0,1131	0,0062

Příklad výpočtu:

Hodnoty pro teplotu vodiče 20 °C (maximální hodnoty zkratových proudů):

$$R_{kv1} = R_k \cdot l = 0,125 \cdot 0,37 = \mathbf{0,0463 \, \Omega}$$

$$X_{kv1} = X_k \cdot l = 0,1131 \cdot 0,37 = \mathbf{0,0418 \, \Omega}$$

Hodnoty pro minimální zkratové poměry se počítají při maximální teplotě vodiče (odporu). Pro kabely s XPLE izolací je maximální pracovní teplota jádra 90 °C. Proto je nutné přepočítat výsledný odpor dle následujícího vzorce. Pro hliník  $\alpha = 0,00377 \, (K^{-1})$ . Výchozí teplota pro uložení v zemi se bere 20 °C.

$$R_{kv1} = R_{20} \cdot (1 - \alpha_{20} \cdot \Delta\vartheta) = 0,0463 \cdot (1 + 0,00377 \cdot 70) = \mathbf{0,0585 \, \Omega}$$

### Přepočet prvků soustavy

Sousledné impedance prvků soustavy, které se nachází na jiné napěťové hladině, se musí přepočítat na napěťovou hladinu, na které jsou počítány zkratové poměry pomocí rovnice (21).

$$Z_2 = Z_1 \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 \quad (21)$$

Kde  $Z_2$  impedance přepočtena na napěťovou hladinu  $U_2$  v místě zkratu  
 $Z_1$  impedance zařízení na napěťové hladině  $U_1$

### 4.3.3 Výsledné hodnoty zkratových poměrů (K3-K7 S=150 mm<sup>2</sup>)

Zkratové poměry byly počítány metodou ekvivalentního napětového zdroje v místě zkratu dle ČSN EN 60909-0. A to pro místa pravděpodobného výskytu naznačená v přehledovém schématu rozvodny viz Obr. 7.

Maximální zkratové proudy pro jednotlivá místa byly počítány vždy se sepnutou spojkou, která je za normálního bezporuchového provozu rozepnuta.

Minimální zkratové proudy byly počítány s rozpojenou spojkou.

Pro jednotlivá místa zkratových jevů jsou v příloze A uvedeny náhradní schémata pro souslednou složku proudu. A to jak pro minimální zkratové proudy, tak pro maximální zkratové proudy.

V Tab. 4.3.3-1 jsou uvedeny výsledné hodnoty zkratových proudů pro jednotlivé rozvaděče. Jak je patrné, nejvyššího zkratového proudu (výkonu) soustava dosahuje v rozvaděči =RVN+RH. Tato skutečnost je dána tím, že se jedná o hlavní rozvaděč připojený k distribuční soustavě (=DS).

Tab. 4.3.3–1 Výsledné hodnoty zkratových jevů (K3-K7 S=150 mm<sup>2</sup>)

	=RVN+RH (6,3 kV)		=RVN+PR (6,3 kV)		=TRS2+RH_NN (0,4 kV)		=TRS3+RH_NN (0,4 kV)	
typ	$I_k''$ (kA)	$S_k''$ (MVA)	$I_k''$ (kA)	$S_k''$ (MVA)	$I_k''$ (kA)	$S_k''$ (MVA)	$I_k''$ (kA)	$S_k''$ (MVA)
3f	14,40	157,09	13,94	152,11	65,12	45,11	64,99	45,03
2f	12,47	136,04	12,07	131,73	56,39	39,07	56,28	38,99
1f	Nevznikne IT síť							

Podrobnější výsledky jsou uvedeny v Příloze B, kde jsou uvedeny minimální zkratové proudy jednotlivých zkratových míst. Dále byly vyčísleny příspěvky jednotlivých zařízení (Kogenerační jednotky a nadřazené sítě) viz Příloha B Tab. B-3. Tento zkratový příspěvek byl uvažován do nejbližšího rozvaděče VN.

Dále byly vyčísleny hodnoty nárazového zkratového proudu pro jednotlivé rozvaděče viz Tab. 4.3.3-2, které slouží pro návrh rozvaděčů a jejich příslušenství s ohledem na dynamické namáhání.

Tab. 4.3.3–2 Výsledné hodnoty zkratových jevů (K3-K7 S=150 mm<sup>2</sup>)

	Všechny kogenerační jednotky v provozu			
	=RVN+RH	=RVN+PR	=TRS2+RH_NN	=TRS3+RH_NN
typ	$i_p$ (kA)	$i_p$ (kA)	$i_p$ (kA)	$i_p$ (kA)
3f	35,47	32,42	149,93	149,11
2f	30,72	28,07	129,85	129,13
1f	Nevznikne IT síť		Nepočítáno	

#### Poznámka:

Při celkovém „ručním“ výpočtu byl využit software Microsoft EXCEL, který pracuje s čísly až na 15 desetinných míst. Pro následující výsledky a výsledky uvedené v příloze B jsou výsledné hodnoty zaokrouhleny na 2 desetinná místa v případě zkratových proudů a na 5 desetinných míst v případě impedancí.

#### 4.3.4 Kontrola kabelů na tepelné účinky zkratových proudů (K3-K7 S=150 mm<sup>2</sup>)

S přihlédnutím ke skutečnosti, že nejvyššího zkratového proudu síť dosahuje v rozvaděči =RVN+RH, bude kontrola kabelů na tepelné účinky zkratových proudů provedena pro tuto hodnotu. Rázový zkratový proud dosahuje hodnoty  $I_k'' = 14,4 \text{ kA}$  při parametrech zkratového obvodu  $\underline{Z}_k = 0,02815 + j0,2765 \Omega$ .

Pro určení součinitelů  $m$  je nutné vyčíslit součinitel  $\kappa$  dle rovnice (11):

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3 R/X} = 1,02 + 0,98e^{-3 (0,02815/0,2765)} = 1,742$$

Tento koeficient je nutný pro výpočet koeficientu  $m$ , s kterým norma ČSN EN 60909-1 počítá ekvivalentní oteplovací proud  $I_{th}$  (odečet z příslušného grafu Obr. 21 v [8] je v některých případech značně nepřesný).

$$m = \frac{1}{2 \cdot f \cdot T_k \ln(\kappa - 1)} \cdot [e^{4 \cdot f \cdot T_k \ln(\kappa - 1)} - 1] = \frac{1}{2 \cdot 50 \cdot 1 \ln(1,742 - 1)} \cdot [e^{4 \cdot 50 \cdot 1 \ln(1,742 - 1)} - 1] = 0,0335$$

Hodnota koeficientu  $n = 1$

$$I_{th} = I_k'' \cdot \sqrt{m + n} = 14,44 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{0,0335 + 1} = 14,68 \text{ kA}$$

Dále je nutné určit koeficient  $k$ , který zohledňuje fyzikální vlastnosti a teplotu vodiče před a po zkratu. Koeficient lze určit z rovnice (9), použít hodnotu danou výrobcem kabelu, popřípadě nalezneme v tab. 11 a 12 [9].

$$k = \sqrt{\frac{(\vartheta_f + 20) \cdot c_0}{\rho_{20}} \cdot \ln \frac{\vartheta_f + \vartheta_k}{\vartheta_f + \vartheta_1}} = \sqrt{\frac{(228 + 20) \cdot 2,417}{0,02941} \cdot \ln \left( \frac{228 + 250}{228 + 70} \right)} = 98,14 \quad \left( \text{A} \cdot \text{s}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{mm}^{-2} \right)$$

V případě výpočtu dle rovnice (9) parametr  $\vartheta_k$  uvádí výrobce kabelu, teplota  $\vartheta_1$  je brána jako provozní teplota kabelů povýšená na hodnotu 70 °C. Tuto skutečnost norma dovoluje za předpokladu, že jsou kabely málo vytíženy. U navrhovaných kabelů, u kterých je známo jejich proudové zatížení (dáno maximálním výkonem kogeneračních jednotek), je z tohoto důvodu použita jiná výchozí teplota  $\vartheta_1$  než maximální provozní teplota kabelu. Ostatní hodnoty převzaty z [9].

$$\vartheta_f = 228 \text{ °C}$$

$$c_0 = 2,417 \text{ J} \cdot \text{cm}^3 \text{ °C}^{-1}$$

$$\vartheta_k = 250 \text{ °C}$$

$$\rho_{20} = 0,02941 \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\vartheta_1 = 70 \text{ °C}$$

$$S_{min} = \frac{I_{th} \cdot \sqrt{t_k}}{k} = \frac{14,68 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{1}}{98,14} = 149,58 \text{ mm}^2$$

Vzhledem ke zvolenému průřezu kabelů 150 mm<sup>2</sup> je splněna podmínka  $S > S_{min}$ , ale z důvodu prakticky nulové rezervy a snížení teploty  $\vartheta_1$  o 20 °C je optimální zvolit vyšší průřez → 3x1x185 mm<sup>2</sup>. Touto změnou průřezu se změní zkratové poměry v rozvodu (zvětší se zkratové proudy). Proto je nutné přepočítat zkratové poměry a ověřit odolnost kabelů vůči tepelným účinkům zkratového proudu.

## 4.4 Optimální návrh kabelů (K3-K7 S=185 mm<sup>2</sup>)

### 4.4.1 Sousedné impedance soustavy

Z důvodu volby vyššího minimálního průřezu vodičů 185 mm<sup>2</sup> viz předchozí kapitola, je nutné přepočítat zkratové poměry sítě. Z důvodu vyššího průřezu vodičů (150 mm<sup>2</sup> → 185 mm<sup>2</sup>) budou zkratové proudy vyšší, nepříznivější pro soustavu.

Při výpočtu sousledných impedancí soustavy se změní pouze činný odpor a induktivní reaktance změněných kabelů. Ostatní parametry jsou shodné s Tab. 4.3.2-1, Tab. 4.3.2-2, Tab. 4.3.2-3. Nové parametry sousledných impedancí pro kabely jsou uvedeny v Tab. 4.4.1-1.

Výpočet zkratových poměrů je shodný s kap. 4.3, shodná jsou i náhradní schémata zkratových obvodů, viz příloha A.

**Kabely:**

Tab. 4.4.1-1 Parametry kabelů pro výpočet zkratových poměrů (K3-K7 S=185 mm<sup>2</sup>)

Kabely								
	$U_n$ (kV)	$l$ (km)	$S$ (mm <sup>2</sup> )	$R_k$ (Ω/km)	$R_{kv}$ (Ω) 20°C	$R_{kv}$ (Ω) 90°C	$X_k$ (Ω/km)	$X_{kv}$ (Ω)
K1	22	0,37	240	0,125	0,0463	0,0585	0,113	0,0418
K2	22	0,37	240	0,125	0,0463	0,0585	0,113	0,0418
K3	6,3	0,183	185	0,164	0,0300	0,0379	0,110	0,0201
K4	6,3	0,183	185	0,164	0,0300	0,0379	0,110	0,0201
K5	6,3	0,215	185	0,164	0,0353	0,0446	0,110	0,0236
K6	6,3	0,024	185	0,164	0,0039	0,0050	0,110	0,0026
K7	6,3	0,055	185	0,164	0,0090	0,0114	0,110	0,0060

### 4.4.2 Provozní teplota kabelů (K3-K7 S=185 mm<sup>2</sup>)

Vzhledem k zvětšenému průřezu jader vodičů a tím značnému nárůstu maximálního dovoleného zatěžovacího proudu (nárůst o 58,3 A) se rapidně zmenšila provozní teplota u kabelů na hladině 6,3 kV o 18,9 °C. Pro kabely na hladině 22 kV je tato hodnota stejná (jejich průřez je nezměněn).

Tab. 4.4.2-1 Provozní teploty kabelů (K3-K7 S=185 mm<sup>2</sup>)

Kabely									
		Průřez jádra	Zatěžovací proud	Dovolený proud uložením	Výchozí teplota uložení	Maximální provozní teplota	Dovolené provozní oteplení	Oteplení proudem	Provozní teplota
	$U$ (kV)	$S$ (mm <sup>2</sup> )	$I_z$ (A)	$I_D$ (A)	$\vartheta_0$ (°C)	$\vartheta_m$ (°C)	$\Delta\vartheta_m$ (°C)	$\Delta\vartheta_z$ (°C)	$\vartheta$ (°C)
K1	22	3x240	50,65	319,0	20	90	70	0,71	20,71
K2	22	3x240	101,30	319,0	20	90	70	4,01	24,01
K3	6,3	3x185	176,87	275,0	20	90	70	23,30	43,30
K4	6,3	3x185	176,87	275,0	20	90	70	23,30	43,30
K5	6,3	3x185	176,87	275,0	20	90	70	23,30	43,30
K6	6,3	3x185	176,87	275,0	20	90	70	23,30	43,30
K7	6,3	3x185	176,87	275,0	20	90	70	23,30	43,30

#### 4.4.3 Výsledné hodnoty zkratových poměrů (K3-K7 S=185 mm<sup>2</sup>)

Zkratové poměry byly počítány stejnou metodou výpočtu jako v případě kapitoly 4.3.3.

Maximální zkratové proudy pro jednotlivá místa byly počítány vždy se sepnutou příčnou spojkou, která je za normálního bezporuchového provozu rozepnuta.

Minimální zkratové proudy byly počítány s rozpojenou příčnou spojkou.

Pro jednotlivá místa zkratových jevů jsou v příloze A uvedeny náhradní schémata pro souslednou složku proudu. A to jak pro minimální zkratové proudy, tak pro maximální zkratové proudy.

V Tab. 4.4.3-1 jsou uvedeny výsledné hodnoty zkratových proudů pro jednotlivé rozvaděče. Jak je patrné, nejvyššího zkratového proudu (výkonu) soustava dosahuje v rozvaděči =RVN+RH, tato skutečnost je dána tím, že se jedná o hlavní rozvaděč připojený k distribuční soustavě (=DS).

Tab. 4.4.3–1 Výsledné hodnoty zkratových jevů (K3-K7 S=185 mm<sup>2</sup>)

	=RVN+RH (6,3 kV)		=RVN+PR (6,3 kV)		=TRS2+RH_NN (0,4 kV)		=TRS3+RH_NN (0,4 kV)	
typ	$I_k''$ (kA)	$S_k''$ (MVA)	$I_k''$ (kA)	$S_k''$ (MVA)	$I_k''$ (kA)	$S_k''$ (MVA)	$I_k''$ (kA)	$S_k''$ (MVA)
3f	14,40	157,10	13,97	152,44	65,14	45,13	65,02	45,05
2f	12,47	136,05	12,10	132,02	56,42	39,09	56,31	39,01
1f	Nevznikne IT síť							

Podrobnější výsledky jsou uvedeny v Příloze C, kde jsou uvedeny minimální zkratové proudy jednotlivých zkratových míst. Dále byly vyčísleny příspěvky jednotlivých zařízení (Kogenerační jednotky a nadřazené sítě), viz Příloha C Tab. C-3. Tento zkratový příspěvek byl uvažován do nejbližšího rozvaděče VN.

Dále byly vyčísleny hodnoty nárazového zkratového proudu pro jednotlivé rozvaděče, viz Tab. 4.4.3-2, který slouží pro návrh rozvaděčů a jejich příslušenství s ohledem na dynamické namáhání.

Tab. 4.4.3–2 Výsledné hodnoty zkratových jevů (K3-K7 S=185 mm<sup>2</sup>)

	Všechny kogenerační jednotky v provozu			
	=RVN+RH	=RVN+PR	=TRS2+RH_NN	=TRS3+RH_NN
typ	$i_p$ (kA)	$i_p$ (kA)	$i_p$ (kA)	$i_p$ (kA)
3f	35,48	32,87	150,29	149,57
2f	30,72	28,46	130,15	129,53
1f	Nevznikne IT síť		Nepočítáno	

#### Poznámka

Při celkovém „ručním“ výpočtu byl využit software Microsoft EXCEL, který pracuje s čísly až na 15 desetinných míst. Pro následující výsledky a výsledky uvedené v příloze C jsou výsledné hodnoty zaokrouhleny na 2 desetinná místa v případě zkratových proudů a na 5 desetinných míst v případě impedancí.

#### 4.4.4 Kontrola kabelů na tepelné účinky zkratových proudů (K3-K7 S=185mm<sup>2</sup>)

Stejně jako v kap. 4.2.3. dosáhl zkratový proud nejvyšší hodnoty v rozvaděči =RVN+RH. Proto bude kontrola kabelů na tepelné účinky zkratových proudů provedena též pro tento případ. Rázový zkratový proud dosahuje hodnoty  $I_k'' = 14,4 \text{ kA}$ , při parametrech zkratového obvodu  $Z_k = 0,0281 + j0,27649 \Omega$ . Hodnota 3f rázového zkratového proud  $I_k''$  je (po zaokrouhlení na 2 desetinná místa) totožná. Rozdílný je poměr R/X, tento poměr má vliv na celkový výsledek ekvivalentního oteplovacího proudu  $I_{th}$ .

Výpočet součinitele  $\kappa$  dle rovnice (11) pro určení součinitele  $m$  pro tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu:

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3 R/X} = 1,02 + 0,98e^{-3 (0,0281/0,27649)} = 1,742$$

$$m = \frac{1}{2 \cdot f \cdot T_k \ln(\kappa - 1)} \cdot [e^{4 \cdot f \cdot T_k \ln(\kappa - 1)} - 1] = \frac{1}{2 \cdot 50 \cdot 1 \ln(1,742 - 1)} \cdot [e^{4 \cdot 50 \cdot 1 \ln(1,742 - 1)} - 1] = 0,0335$$

Hodnota koeficientu  $n = 1$

$$I_{th} = I_k'' \cdot \sqrt{m + n} = 14,4 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{0,0335 + 1} = 14,64 \text{ kA}$$

Koeficient  $k$  se od kapitoly 4.2.4. liší pouze jinou výchozí teplotou kabelů před zkratem  $\vartheta_1$ . Výchozí teplota byla snížena vzhledem ke značnému poklesu provozní teploty (o 18,9 °C) kabelů ze 70 °C na 50 °C.

$$k = \sqrt{\frac{(\vartheta_f + 20) \cdot c_0}{\rho_{20}} \cdot \ln \frac{\vartheta_f + \vartheta_k}{\vartheta_f + \vartheta_1}} = \sqrt{\frac{(228 + 20) \cdot 2,417}{0,02941} \cdot \ln \left( \frac{228 + 250}{228 + 50} \right)} = 105,1 \quad \left( A \cdot s^{\frac{1}{2}} \cdot mm^{-2} \right)$$

Tomuto koeficientu odpovídá minimální průřez:

$$S_{min} = \frac{I_{th} \cdot \sqrt{t_k}}{k} = \frac{14,64 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{1}}{105,1} = 139,3 \text{ mm}^2$$

I vzhledem ke stejné hodnotě zkratového proudu jako v případě použití kabelů s průřezem jádra 150 mm<sup>2</sup> vyšel potřebný minimální průřez jádra menší než v kap. 4.3.4. Tento paradox je dán snížením teploty kabelu před zkratem  $\vartheta_1 = 50 \text{ °C}$ . Tím došlo ke zvýšení koeficientu  $k$  z hodnoty  $k = 98,14$  na  $k = 105,1$ .

Zpětná kontrola výpočtu. Rovnice (22) udává maximální přípustnou dobu trvání zkratu, kterou kabel bez poškození vydrží.

$$t = \left( \frac{S \cdot k}{I_{th}} \right)^2 = \left( \frac{185 \cdot 105,1}{14,64 \cdot 10^3} \right)^2 = 1,76 \text{ s} \quad (22)$$

I v případě zvýšení provozní teploty  $\vartheta_1$  z 50 °C na 90 °C kabel vydrží teplotní namáhání zkratovým proudem. (V tomto případě je hodnota parametru  $k = 91,14$ ,  $S_{min} = 161,12 \text{ mm}^2$  a maximální přípustná doba vypnutí zkratu  $t = 1,32 \text{ s}$ . Z těchto důvodů jsou kabely -K3 až -K7 v provedení



3x(10-AXEKVCEY 1x185) vhodné pro bezpečný provoz zařízení s ohledem na tepelné účinky zkratových proudů.

Z důvodu vyšších zkratových poměrů v síti je nutné stávající kabelový propoj -K5 3x (10-AXEKVCEY 1x120) spojující KGJ1 s rozvaděčem nahradit novým kabelem s průřezem jádra  $185 \text{ mm}^2 \rightarrow 3x(10\text{-AXEKVCEY } 1x185)$ .

#### 4.4.5 Ověření kabelů NN 8x(1-CYKY 3x240+120)

Provozní proud danými kabely je vzat z kap 4.3  $I_1 = 2785,72$  A, při uložení E (více žilové kabely uložené ve vzduchu tab. B.52.10 sloupec 3 normy ČSN 33 2000-5-52 ed. 2). Pro výpočet dovoleného proudu daným uložením použijeme vzorec (14). Kabely budou uloženy volně ve dvou perforovaných lávkách, tomu odpovídá korekční koeficient  $k_2 = 0,92$  (tabulka B.52.20 normy ČSN 33 2000-5-52 ed.2).

Tab. 4.4.5–1 Proudová zatížitelnost NN kabelů

Ověřovaný kabel		Uložení E					
Izolace PVC		Dovolený proud vodičem	Přepočítávací koeficienty pro dané uložení			Max. dovolený proud	
Materiál jádra	Průřez jádra	$I_D$ (A)	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$I_{max}$ (A)	Vyhovuje
Cu	185	364	1	0,92	8	2679,04	NE
	240	430	1	0,92	8	3164,8	ANO

Kabely NN 8x(1-CYKY 3x240+120) jsou proudově dostatečně dimenzovány.

**Poznámka:**

Při použití hliníkových jader by minimální průřez činil 8x(1-CYKY 3x300+120) a to s proudovou rezervou jen 18,5 A.

Tab. 4.4.5–2 Provozní teplota kabelů NN 8x(1-CYKY 3x240+120)

Kabely 8x(1-CYKY 3x240+120)							
Průřez jádra	Zatěžovací proud	Dovolený proud uložení	Výchozí teplota uložení	Maximální provozní teplota	Dovolené provozní oteplení	Oteplení proudem	Provozní teplota
$S$ (mm <sup>2</sup> )	$I_z$ (A)	$I_D$ (A)	$\vartheta_0$ (°C)	$\vartheta_{max}$ (°C)	$\Delta\vartheta_{max}$ (°C)	$\Delta\vartheta_z$ (°C)	$\vartheta$ (°C)
8x(3x240+120)	2785,72	3164,8	30	70	40	29,11	59,11

Ověřování těchto kabelů bude provedeno pro rozvaděč =TRS3+RH\_NN. V tomto rozvaděči dosahují potřebné hodnoty pro kontrolu nejvyšších hodnot, zkratový proud  $I_k'' = 65,14$  kA při parametrech zkratového obvodu  $\underline{Z}_k = 0,00061 + j0,00385 \Omega$ .

Součinitel  $\kappa$  dle rovnice (11) pro určení součinitele  $m$  pro tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu:

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3 R/X} = 1,02 + 0,98e^{-3 (0,00061/0,00385)} = 1,629$$

Koeficient  $m$  respektující působení stejnosměrné složky zkratového proudu:

$$m = \frac{1}{2 \cdot f \cdot T_k \ln(\kappa - 1)} \cdot [e^{4 \cdot f \cdot T_k \ln(\kappa - 1)} - 1] = \frac{1}{2 \cdot 50 \cdot 1 \ln(1,629 - 1)} \cdot [e^{4 \cdot 50 \cdot 1 \ln(1,629 - 1)} - 1] = 0,0216$$

Hodnota koeficientu  $n = 1$

$$I_{th} = I_k'' \cdot \sqrt{m+n} = 65,17 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{0,0216+1} = 65,84 \text{ kA}$$

Koeficient  $k$  se od předešlých případů (kap 4.2.4 a kap 4.3.4) liší vzhledem k použití měděného jádra místo hliníkového v:  $\vartheta_1 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta_f = 234,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta_k = 160 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $c_0 = 3,5 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $\rho_{20} = 0,01786 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ .

$$k = \sqrt{\frac{(\vartheta_f + 20) \cdot c_0}{\rho_{20}} \cdot \ln \frac{\vartheta_f + \vartheta_k}{\vartheta_f + \vartheta_1}} = \sqrt{\frac{(234,5 + 20) \cdot 3,5}{0,01786} \cdot \ln \left( \frac{234,5 + 160}{234,5 + 70} \right)} = 113,64 \quad \left( \text{A} \cdot \text{s}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{mm}^{-2} \right)$$

Tomuto koeficientu odpovídá minimální průřez:

$$S_{min} = \frac{I_{th} \cdot \sqrt{t_k}}{k} = \frac{65,84 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{1}}{113,64} = 579,4 \text{ mm}^2$$

Zpětná kontrola výpočtu. Rovnice (22) udává maximální přípustnou dobu trvání zkratu, kterou kabel bez poškození vydrží.

$$t = \left( \frac{S \cdot k}{I_{th}} \right)^2 = \left( \frac{1920 \cdot 113,64}{65,84 \cdot 10^3} \right)^2 = 10,98 \text{ s}$$

Podmínka  $S_{min} \leq S$  je splněna ( $579,4 \text{ mm}^2 \leq 1920 \text{ mm}^2$ ) a je zaručena dostatečná rezerva, při těchto podmínkách může zkrat trvat 10,98 s bez poškození silových kabelů. I v případě zvýšení teploty  $\vartheta_1$  na hodnotu  $\vartheta_1 = 90 \text{ }^\circ\text{C}$  je zaručena dostatečná rezerva.

#### 4.4.6 Ověření výsledků s programem Zkratý 2.0

Program Zkratý 2.0 slouží jako softwarová podpora pro výpočet zkratových poměrů v střídavých elektrických sítích dle normy ČSN EN 60909-0.

##### **Základní vlastnosti programu:**

- počítá trojfázové zkratové proudy ve střídavých soustavách nízkého, vysokého a velmi vysokého napětí, při jmenovitém kmitočtu 50 Hz;
- počítá počáteční souměrný rázový zkratový proud, nárazový zkratový proud a ekvivalentní oteplovací zkratový proud;
- umožňuje výpočet maximálních a minimálních zkratových proudů;
- počítá napětí v uzlech sítě a proudy ve větvích při zkratu;
- umožňuje řešit paprskové i mřížové sítě;
- umožňuje zadání skutečných převodů transformátorů;
- obsahuje databáze základních prvků soustavy (vedení a kabely, transformátory, ...), které je možné dále doplňovat;
- umožňuje jednoduché zadání vstupních dat pro výpočet, s možností rychlé změny konfigurace sítě odpojením zvolených větví nebo spojením vybraných uzlů beze změny souboru vstupních dat.

##### **Omezení programu:**

- Neřeší dvoufázové zemní a jednofázové zkratý.
- Není vhodný pro přesný výpočet zkratových proudů uvnitř elektrárenského bloku.

Výpočet minimálního průřezu kabelu vychází z hodnoty uzlového ekvivalentního oteplovacího proudu na začátku nebo na konci kabelu, také doba trvání zkratového proudu se uvádí pro každý uzel.

Toto nemusí odpovídat skutečnosti, proto je nutné tyto data brát POUZE JAKO INFORMATIVNÍ HODNOTY. Záleží na řešiteli, aby podle konfigurace sítě kriticky posoudil, který údaj je správný, případně provedl před výpočtem minimálního průřezu kabelu odpovídající zásahy v zadání výpočtu. [15]

Z tohoto důvodu nebude porovnáván výsledek výpočtu minimálního průřezu kabelu programem Zkratý 2.0 s „ručním“ výpočtem.

Jako výchozí výsledek je brán výsledek z programu Zkratý 2.0. Výsledky „ručního“ výpočtu jsou zaokrouhleny na stejný počet desetinných míst jako v případě výsledků z programu Zkratý 2.0.

### Počáteční souměrný zkratový proud $I_k''$ :

Výsledné hodnoty počátečního souměrného zkratového proudu  $I_k''$  jsou ve všech případech téměř totožné. Největší rozdíl 0,49 % je ve výsledku zanedbatelný.

Tab. 4.4.6–1 Porovnání výsledku zkratového proudu  $I_k''$

Porovnání výpočtu zkratových poměrů					
Veličina	Napěťová hladina	Místo poruchy	Výpočet pomocí Zkraty 2.0 (kA)	"Ruční" výpočet (Excel) (kA)	Rozdíl (%)
	$U_n$ (kV)				
$I_k''$ (kA)	6,3	=RVN+RH	14,41	14,40	0,07%
	6,3	=RVN+PR	13,99	13,97	0,14%
	0,4	=TRS3+RH_NN	65,45	65,14	0,47%
	0,4	=TRS2+RH_NN	65,34	65,02	0,49%

### Počáteční souměrný zkratový proud $I_{k2}''$ :

I v případě výpočtu počátečního souměrného zkratového proudu  $I_{k2}''$  je největší rozdíl 0,48 % zanedbatelný. V obou případech výpočtu byla hodnota  $I_{k2}''$  získána za pomoci zjednodušeného výpočtu, viz rovnice (6). V případě výpočtu s uvažováním  $\underline{Z}_{(2)} \neq \underline{Z}_{(1)}$  mohou být výsledky odlišné.

Tab. 4.4.6–2 Porovnání výsledku zkratového proudu  $I_{k2}''$

Porovnání výpočtu zkratových poměrů					
Veličina	Napěťová hladina	Místo poruchy	Výpočet pomocí Zkraty 2.0 (kA)	"Ruční" výpočet (Excel) (kA)	Rozdíl (%)
	$U_n$ (kV)				
$I_{k2}''$ (kA)	6,3	=RVN+RH	12,48	12,47	0,08%
	6,3	=RVN+PR	12,12	12,10	0,17%
	0,4	=TRS3+RH_NN	56,68	56,42	0,46%
	0,4	=TRS2+RH_NN	56,58	56,31	0,48%

### Součinitel $\kappa$ :

Rozdíly výsledků jsou maximálně 0,58 %, v praxi zanedbatelná hodnota.

Tab. 4.4.6–3 Porovnání výsledku součinitele  $\kappa$

Porovnání výpočtu zkratových poměrů					
Veličina	Napěťová hladina	Místo poruchy	Výpočet pomocí Zkraty 2.0 (-)	"Ruční" výpočet (Excel) (-)	Rozdíl (%)
	$U_n$ (kV)				
$\kappa$	6,3	=RVN+RH	1,732	1,742	-0,58%
	6,3	=RVN+PR	1,66	1,66	0,00%
	0,4	=TRS3+RH_NN	1,628	1,631	-0,18%
	0,4	=TRS2+RH_NN	1,625	1,627	-0,12%

### Nárazový zkratový proud $i_p$ :

Rozdíly výsledků jsou maximálně 0,54 %, v praxi zanedbatelná hodnota.

Tab. 4.4.6–4 Porovnání výsledku nárazového zkratového proudu  $i_p$

Porovnání výpočtu zkratových poměrů					
Veličina	Napěťová hladina	Místo poruchy	Výpočet pomocí Zkraty 2.0 (kA)	"Ruční" výpočet (Excel) (kA)	Rozdíl (%)
	$U_n$ (kV)				
$i_p$ (kA)	6,3	=RVN+RH	35,29	35,48	-0,54%
	6,3	=RVN+PR	32,83	32,87	-0,12%
	0,4	=TRS3+RH_NN	150,71	150,29	0,28%
	0,4	=TRS2+RH_NN	150,12	149,57	0,37%

### Součinitel m:

Jediný případ, ve kterém jsou výsledky rozdílné a to o 6,25 % nastal pro rozvaděč =RVN+RH. To je pravděpodobně z důvodu rozdílného zaokrouhlování výsledku nebo výsledků mezikroků.

Tab. 4.4.6–5 Porovnání výsledku součinitele m

Porovnání výpočtu zkratových poměrů					
Veličina	Napěťová hladina	Místo poruchy	Výpočet pomocí Zkraty 2.0 (-)	"Ruční" výpočet (Excel) (-)	Rozdíl (%)
	$U_n$ (kV)				
m	6,3	=RVN+RH	0,032	0,034	-6,25%
	6,3	=RVN+PR	0,024	0,024	0,00%
	0,4	=TRS3+RH_NN	0,022	0,022	0,00%
	0,4	=TRS2+RH_NN	0,021	0,021	0,00%

### Ekvivalentní oteplovací proud $I_{th}$ :

V tomto případě byly rozdíly značné ve všech případech, což je dáno tím, že program Zkraty 2.0 potřebný koeficient n počítal, kdežto při „ručním“ výpočtu byla hodnota koeficientu n brána  $n=1$ . V tomto případě se jedná o chybný číselný výsledek, ale s ohledem na bezpečnost se nejedná o zásadní chybu. Pouze bude výsledek zkreslen k vyšším hodnotám minimálního průřezu  $S_{kmin}$ .

Tab. 4.4.6–6 Porovnání výsledku ekvivalentního oteplovacího proudu  $I_{th}$

Porovnání výpočtu zkratových poměrů					
Veličina	Napěťová hladina	Místo poruchy	Výpočet pomocí Zkraty 2.0 (kA)	"Ruční" výpočet (Excel) (kA)	Rozdíl (%)
	$U_n$ (kV)				
$I_{th}$ (kA)	6,3	=RVN+RH	13,74	14,64	-6,55%
	6,3	=RVN+PR	13,27	14,14	-6,56%
	0,4	=TRS3+RH_NN	59,22	65,85	-11,20%
	0,4	=TRS2+RH_NN	59,09	65,72	-11,22%

#### 4.4.7 Elektrické ztráty v rozvodu

Jsou počítány při plném dodávaném výkonu všech kogeneračních jednotek do sítě a provozní teplotě kabelů, tento fakt byl zohledněn z důvodu teplotní závislosti odporu. Hodnota koeficientu  $\alpha_{20}$  je pro hliník  $\alpha_{20} = 0,00377 \text{ (K}^{-1}\text{)}$  K1 až K7, v případě mědi  $\alpha_{20} = 0,00392 \text{ (K}^{-1}\text{)}$  K8 až K10. Hodnoty  $R_{kv}$  a  $X_{kv}$  jsou převzaty z Tab. 4.4.1-1.,  $\Delta\vartheta_z$  převzata z Tab. 4.4.2-1,  $\cos \varphi = 0,8$ .

Tab. 4.4.7-1 Elektrické ztráty VN kabelů

Kabely VN (22 kV a 6,3 kV)						
	$U_n$ (kV)	$I$ (A)	$R_{kv} \text{ (}\Omega\text{)} 20^\circ\text{C}$	$R_{prov} \text{ (}\Omega\text{)}$	$X_k \text{ (}\Omega\text{)}$	$\Delta P \text{ (kW)}$
K1	22	50,65	0,0463	<b>0,0464</b>	0,0418	<b>0,48</b>
K2	22	101,30	0,0463	0,0469	0,0418	1,93
K3	6,3	176,87	0,0300	0,0326	0,0201	3,58
K4	6,3	176,87	0,0300	0,0326	0,0201	3,58
K5	6,3	176,87	0,0353	0,0384	0,0236	4,21
K6	6,3	176,87	0,0039	0,0043	0,0026	0,47
K7	6,3	176,87	0,0090	0,0098	0,0060	1,08
<b>Celkem</b>						<b>15,34</b>

Pro kabely 8x(1-CYKY 8x240+120) je  $\Delta\vartheta_z$  převzata z Tab. 4.4.5-2. Délka brána pro všechny kabely stejná, tj. maximálně možných 10 m při parametrech  $R = 9,38 \cdot 10^{-5} \Omega$  ( $0,075 \Omega/\text{km}$ ) a induktivní reaktance  $X = 9,38 \cdot 10^{-5} \Omega$  ( $0,075 \Omega/\text{km}$ ).

Tab. 4.4.7-2 Elektrické ztráty NN kabelů

Kabely NN (0,4 kV)						
	$U_n$ (kV)	$I$ (A)	$R_{kv} \text{ (}\Omega\text{)} 20^\circ\text{C}$	$R_{prov} \text{ (}\Omega\text{)}$	$X_k \text{ (}\Omega\text{)}$	$\Delta P \text{ (kW)}$
K8	0,4	2785,72	9,38E-05	1,04E-04	9,38E-05	3,25
K9	0,4	2785,72	9,38E-05	1,04E-04	9,38E-05	3,25
K10	0,4	2785,72	9,38E-05	1,04E-04	9,38E-05	3,25
<b>Celkem</b>						<b>9,75</b>

Příklad výpočtu:

$$R_{prov} = R_{kv} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot \Delta\vartheta_z) = 0,0463 \cdot (1 + 0,00377 \cdot 0,71) = \mathbf{0,0464 \Omega}$$

$$\Delta P = 3 \cdot \left( (R_{prov} \cdot I_c^2) + (X_{kv} \cdot I_j^2) \right) = 3 \cdot \left( (R_{prov} \cdot I_n^2 \cdot \cos \varphi) + (X_{kv} \cdot I_n^2 \cdot \sin \varphi) \right)$$

$$\Delta P = 3 \cdot \left( (0,0464 \cdot 50,65^2 \cdot 0,8) + (0,0418 \cdot 50,65^2 \cdot 0,6) \right) = \mathbf{0,48 \text{ kW}}$$

Z výsledků je patrné, že k největším ztrátám dochází na VN kabelu č. 5. I vzhledem k velkému průřezu a malé vzdálenosti (10 metrů každý) vznikají velké ztráty na kabelech vyvádějící výkon z generátorů. Srovnatelné ztráty vznikají na VN kabelech č. 3 a 4.

## 5. Nastavení ochran

Cílem této práce není konkrétní nastavení všech ochran, nastaveny budou pouze nadproudové ochrany vyznačené v přehledové schématu ochran, viz Příloha G.

Ochrany jsou nastavovány pro nově zbudované kogenerační jednotky KGJ2 a KGJ3. V případě kogenerační jednotky KGJ1 se jedná o přenastavení ochrany REF610 v rozvaděči =RVN+RH (konkrétně REF610\_1).

Přívod do rozvaděče =RVN+RH bude chráněn ochranami REF610, které budou chránit kabely před přetížením, zkratem.

V rozvaděči =RVN+PR bude použita ochrana VIP300LL chránící transformátory T2 a T3 (6,3/0,4 kV) a kabely K6 a K7 před přetížením a zkratem.

### Předřazené ochrany

Selektivita ochran bude nastavena vzhledem k ochranám umístěným ve vývodních polích rozvaděče =RVN+RH patřícím distribuční společnosti. Tyto ochrany jsou nastaveny provozovatelem distribuční sítě.

Jedná se o elektromechanické nadproudové ochrany AT 31-X1 a AT 12-X1 chránící transformátor T1 a T2 (22/6,3 kV) a příslušné kabely K1 a K2. Nastavení je pro oba transformátory (vývody) stejné.

#### Nastavené hodnoty:

<u>AT 12-X1</u>	<u>AT 31-X1</u>
$I_{>>} = 815 \text{ A}$	$I_{>>} = 2037 \text{ A}$
$t_{>>} = 10 \text{ s.}$	$t_{>>} = 0,6 \text{ s.}$

#### AT 12-x1:

Jedná se o jednofázovou časově nezávislou nadproudovou ochranu, nastavenou na 1,2 násobek jmenovitého sekundárního proudu transformátoru. Zpoždění je nastaveno na 10 sekund se signalizací. **Ochrana nevypíná.**

#### AT 31-X1:

Jedná se o třífázovou časově nezávislou nadproudovou ochranu nastavenou na 3,5 násobek jmenovitého sekundárního proudu transformátoru se zpožděním 0,6 sekundy. Při tomto nastavení ochrana vypíná. Nastavená hodnota vypínacího proudu je cca  $0,35 \times I_{k2min}$ .

### Ochrana generátorů:

Výběr a nastavení ochran kogeneračních jednotek provedl sám výrobce. V kapitole 5.1 je ověření provedeného nastavení, které musí vyhovět Pravidlům provozování distribučních soustav a musí být schváleno samotným provozovatelem distribuční soustavy.



## 5.1 Síťová ochrana generátoru

Síťová ochrana je součástí samotné KGJ a působí na jistič v rozpadovém místě (V rozvaděči NN samotné kogenerační jednotky). **Ostrovní provoz KGJ není přípustný.** Nastavení ochran pro KGJ určuje a provádí výrobce kogenerační jednotky, **nastavené hodnoty ochran generátoru jsou převzaty od dodavatele.**

Podle „Pravidel provozování distribučních soustav, přílohy 4, Pravidel pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy“ musí ochrana zajistit následující funkce [16]:

Tab. 5.1–1 Doporučená nastavení síťové ochrany dle [16]

Funkce	rozsah nastavení	nastavení	Časové zpoždění	zpoždění
Podpětí 1. stupeň $U<$	$0.70 U_n$ až $1.0 U_n$	$90 \% U_n$	$t_{U<}$	0,5 s
Podpětí 2. stupeň $U<<$	$0.70 U_n$ až $1.0 U_n$	$80 \% U_n$	$t_{U<<}$	0,1 s
Přepětí 1. stupeň $U>$	$1.0 U_n$ až $1.2 U_n$	$110 \% U_n$	$t_{U>}$	0,5 s
Přepětí 2. stupeň $U>>$	$1.0 U_n$ až $1.2 U_n$	$120 \% U_n$	$t_{U>>}$	0,1 s
Podfrekvence 1. stupeň $f<$	48 Hz až 50 Hz	49,8 Hz	$t_{f<}$	0,5 s
Podfrekvence 2. stupeň $f<<$	48 Hz až 50 Hz	49,5 Hz	$t_{f<<}$	0,1 s
Nadfrekvence $f>$	50 Hz až 52 Hz	50,2 Hz	$t_{f>}$	0,5 s

Po dohodě s PDS lze upustit od 2. stupně uvedených ochran. V některých případech může být s ohledem na síťové poměry třeba jiné nastavení ochran.

**Konkrétně pro KGJ2 a KGJ3 se navrhuje nastavení ochran následující:**

Tab. 5.1–2 Nastavení síťové ochrany generátoru

Funkce	nastavení	Časové zpoždění	zpoždění
Podpětí 1. stupeň $U<$	$85 \% U_n$	$t_{U<}$	0,6 s
Přepětí 1. stupeň $U>$	$110 \% U_n$	$t_{U>}$	0,1 s
Podfrekvence 1. stupeň $f<$	49,5 Hz	$t_{f<}$	0,1 s
Nadfrekvence $f>$	51 Hz	$t_{f>}$	0,1 s
Nadproudová tepelná	2800 A	$t_{I<}$	
Nadproudová zkratová	14 kA	$t_{I<<}$	0 s
Vektorová ochrana	10 stupňů	-	0 s
Zpětná wattová	$5 \% P_n$	-	5 s
Ochrana na nesymetrii	$10 \% U_n$	-	0,1 s

Při tomto nastavení síťových ochran kogeneračních jednotek jsou splněny požadavky dané [16] a nově budované kogenerační jednotky mohou být připojeny.

**Ochrany vedení NN mezi TRS a KGJ:**

Kabely NN mezi TRS a KGJ budou ze strany transformátoru chráněny pouze proti zkratu jističem transformátoru, protože trvalý přenos plného výkonu od transformátoru ke KGJ není možný. Ze strany KGJ budou chráněny proti zkratu a přetížení jističem v rozvaděči NN KGJ. **Typ jističe a spouště určuje výrobce kogenerační jednotky.**

## 5.2 Ochrany ARION WL12

Transformátor v = TRS2+RH\_NN a = TRS3+RH\_NN bude na primární straně chráněn proti zkratu spolu s kabelem ochranou VIP300LL v kobce rozvodny =RVN+PR. Na sekundární straně bude chráněn proti zkratu a přetížení vzduchovým jističem ARION WL12 společnosti O EZ s jmenovitým proudem 3200 A opatřeným spouští ETU 25B s charakteristikou LSI, která v sobě kombinuje tři nadproudové spouště: **L** – nadproudová spoušť, **S** – krátkodobě zpožděná zkratová spoušť, **I** – okamžitá zkratová spoušť.

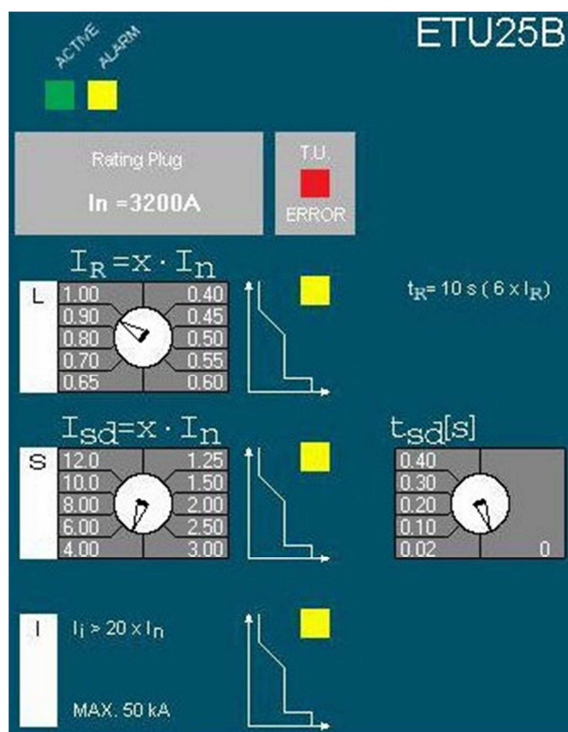
### Nastavení rozběhových článků ochrany ARION WL12:

Rozběhový proud nadproudového článku s  $I^2t$  charakteristikou se provádí jako nejbližší vyšší násobek jmenovitého proudu spouště, lze nastavit od 0,4 – 1x  $I_n$  viz Obr. 8. Nastavena na  $I_S = 2880 \text{ A}$ .

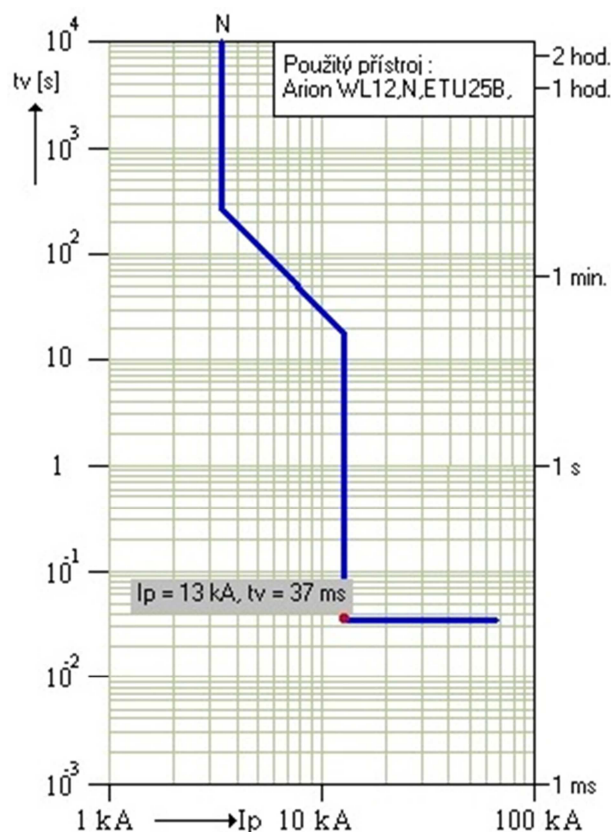
Dále musí platit  $I_Z < I_n < I_S$ . Nastavení krátkodobě zpožděné zkratové spouště je obdobné, pouze s větším násobek jmenovitého proudu (1,25 – 12 x  $I_n$ ) nastaveno na hodnotu  $I_{sd} = 11,52 \text{ kA}$ . Okamžitý zkratový článek je pevně nastaven na 4 x  $I_n$ . Při tomto nastavení vypíná jistič i většinu zkratů na kabelu VN ze strany KGJ a působí tak jako záloha při selhání vektorové ochrany.

$$I_R = x \cdot I_n = 0,9 \cdot 3200 = 2880 \text{ A}$$

$$I_{sd} = x \cdot I_n = 4 \cdot 3200 = 11,52 \text{ kA}$$



Obr. 8 Nastavení spouště ETU25B



Obr. 9 Vypínací charakteristika jističe ARION WL12

### 5.3 Ochrany VIP300LL

Ochrany VIP300LL jsou umístěny v rozvaděči =RVN+PR a tím chrání transformátory a kabely K6 a K7 před poruchami ze strany distribuční sítě. Vzhledem k téměř totožným parametrům chráněného obvodu budou obě ochrany nastaveny stejně. Samotná ochrana VIP300LL je určena pro distribuční a průmyslové sítě. Může být použita též jako ochrana transformátoru na VN nebo NN straně, ochrana vývodu. Ochrana v sobě integruje nadproudovou nesměrovou spoušť a ochranu proti zemním poruchám. Obě jsou separátně nastavitelné ve dvou úrovních (s nižším stupněm seřiditelnosti a vyšším stupněm seřiditelnosti). Podrobnější popis vlastní ochrany a jejího nastavení [17].

#### 5.3.1 Vlastní nastavení ochran

##### Nastavení nadproudového článku s nižším stupněm seřiditelnosti ( $I>$ ):

###### Rozběhový proud:

Jmenovitý zatěžovací proud kabelu VN je 176,87 A. Nejbližší vyšší nastavitelná hodnota rozběhového proudu je 180 A. Tato nastavená hodnota není skutečný rozběhový proud, ochrana se uvádí do běhu až při překročení hodnoty odpovídající  $1,2 \cdot I_S$  (takzvaný bezpečnostní koeficient), tím pádem skutečný rozběhový proud je roven  $I_S = 1,2 \cdot 180 = 216$  A. Na všechny proudy nižších hodnota než je 216 A ochrana nereaguje.

###### Vypínací charakteristika:

Jako vypínací charakteristika nadproudového článku byla vybrána charakteristika extrémně časově závislá dle standardu IEC 60255-3. Podrobnější nastavení charakteristik, viz [17], [19 strana 34].

##### Nastavení nadproudového článku s vyšším stupněm seřiditelnosti ( $I>>$ ):

Nastavuje se jako celočíselný násobek rozběhového proudu ochrany (proudu nastaveného pomocí přepínače  $I_S$ ), nastaven na hodnotu  $6 \times I_S = 6 \cdot 180 = 1080$  A. Zkratový článek je časově nezávislý a neobsahuje možnost výběru jiné charakteristiky jako nadproudový článek s nižším stupněm seřiditelnosti, pouze dovoluje nastavit časové zpoždění  $t \gg = 0,1$  s.

##### **Nastavení přepínačů:**

Přepínač	Nastavená hodnota
$I_S$	180 A
$I >$	EI (Extrémně inverzní)
$k_{vch}$	0,6 (nastavení sklonu charakteristiky $t >$ )
$I \gg$	$6 \times I_S$ (1080 A)
$t \gg$	0,1 (s)

## 5.4 Ochrana REF610

Jedná se o univerzální multifunkční digitální ochranu, určenou především k chránění přívodů a vývodů v distribučních rozvodnách vysokého napětí. Dále ji lze použít jako záložní ochranu motorů, transformátorů a generátorů. Ochrana v sobě integruje třístupňovou nadproudovou ochranu, dvoustupňovou nesměrovou zemní ochranu, tepelnou ochranu, jako doplňkovou ochranu lze použít zábleskovou ochranu a funkci opětovného zapnutí. Tím je docíleno komplexního chránění proti zkratům, nadproudům a zemním poruchám. Ochrana dále dokáže svou činnost trvale monitorovat systémem samočinné kontroly, který prostřednictvím sériové komunikační sběrnice dokáže vzdáleně informovat obsluhu o poruchách, popřípadě provádět dálkové zásahy. Dále nabízí HMI (Human Machine Interface) rozhraní, které umožňuje jednoduché a bezpečné místní ovládání ochrany.

Samotná ochrana se nastavuje pomocí jednotlivých bitů přepínačových skupin, viz [19 strana 48-57]:

### **Přepínačová skupina:**

SGF1	Výstupní kontakty
SGF2	Nastavení displeje
SGF3, SGF4	Ochranné funkce
SGF5	Přídržná funkce u programovatelných LED diod
SGB1...SGB5	Binární vstupy (DI1...DI5)
SGR1...SGR8	Výstupní kontakty (PO1, PO2, PO3, SO1, SO2, SO3, SO4, SO5)
SGL1...SGL8	Programovatelné LED diody

Nastavené hodnoty je možné měnit prostřednictvím systému ovládání HMI nebo pomocí osobního počítače (PC), který je vybaven programem pro nastavení ochrany "Relay Setting Tool".

Samotné nastavení všech ochran REF610 bylo provedeno pomocí softwaru "Relay Setting Tool".

Vzhledem k relativně hojným možnostem nastavení ochran REF610, bude pro tyto ochrany uveden pouze příklad výpočtů rozběhových proudů pro ochranu REF610\_1, ostatní ochrany vycházejí ze stejné filozofie. Byl pouze zvolen jiný číselný násobek rozběhových proudů. Podrobnější nastavení jednotlivých ochran je uvedeno v Příloze H, I, J.

#### 5.4.1 Ochrana REF610\_1

Chrání přívod do rozvaděče =RVN+RH a tím kabel K5, který přenáší výkon dodávaný kogenerační jednotkou KGJ1.

##### Nastavení nadproudového článku s nižším stupněm seřiditelnosti ( $I_S$ ):

Nastavení článku  $I_S$  vychází z hodnot vypočtených pro ochranu VIP300LL tzn.  $I_S = 216 \text{ A}$ . Stejná hodnota byla zvolena z důvodu stejného chráněného obvodu jako v případě ochrany VIP300LL.

Nadproudový článek s vyšším stupněm seřiditelnosti vychází také z nastavené hodnoty ochrany VIP300LL. Jako základ je brána hodnota nastaveného rozběhového proudu nadproudového článku ochrany VIP300LL ( $I_S = 180 \text{ A}$ ) a jeho celočíselný násobek a zároveň je menší než hodnota nastavená pro ochrany AT31-X1.

$$I_S = 180 \cdot 6 = 1080 \text{ A}$$

Rozběhové proudy jednotlivých článků se nastavují jako násobky jmenovitého primárního proudu přístrojového transformátoru proudu. V případě rozběhového proudu ochrany 216 A, jmenovitého primárního proudu přístrojového transformátoru 200 A se rozběhový proud rovná:

$$I_S = \frac{216}{200} = 1,08 \rightarrow I_S = 1,08 \cdot I_n$$

Všechny ostatní veličiny se nastavují stejným způsobem. Ochrana je nastavena stejně jako ochrany VIP300LL.

##### Připojení na PT:

- 200/5A, 10/15VA, 0,5%/5P10

##### Nastavené hodnoty:

Funkce	Nastavená hodnota
$I_S > / I_n$	1,08 x $I_n$ (216 A)
IDMT $I >$	1 EI (Extrémně inverzní)
$k_{vch}$	0,6 (nastavení sklonu charakteristiky)
$I_S \gg / I_n$	5,4 x $I_n$ (1080 A)
$t \gg$	0,1 (s)

### 5.4.2 Ochrana REF610\_2

Je určena jako ochrana příčné spojky rozvaděče =RVN+RH.

Chrání proti nadproudům a zkratům.

Rozběhový proud nadproudového článku je nastaven jako dvojnásobek rozběhového proudu pro jednu kogenerační jednotku. To znamená, že umožňuje kogeneračním jednotkám KGJ2 a KGJ3 dodávat výkon do sítě i v případě odpojení transformátoru T2 (na hladině 22/6,3 kV) přes transformátor T1 (na hladině 22/6,3 kV).

Selektivita je dosažena „pomalejší“ vypínací charakteristikou stupně  $I>$  a delší dobou vypnutí stupně  $I>>$  o 0,15 s než předřazené ochrany REF610\_3 a o 0,15 s rychleji než ochrana AT31-X1.

Připojení na PT:

- 400//5A, 10/15VA, 0,5%/5P10

#### **Nastavené hodnoty**

Funkce	Nastavená hodnota
$I_S >/I_n$	1,08 x $I_n$ (432 A)
IDMT $I >$	1 EI (Extrémně inverzní)
$k_{vch}$	0,5 (nastavení sklonu charakteristiky)
$I_S >>/I_n$	4,05 x $I_n$ (1620 A)
$t >>$	0,45 (s)

### 5.4.3 Ochrana REF610\_3

Chrání přívod do rozvaděče =RVN+RH a tím kabely K3 a K4, které přenáší výkon dodávaný kogeneračními jednotkami KGJ2 a KGJ3.

Větší proudový rozestup (597 A) mezi ochranou REF610\_1 a ochranou AT31-X1 je z důvodu zajištění dostatečného jak časové, tak proudové rozestupu mezi digitální ochranou (REF610\_3) a elektromechanickou ochranou (AT31-X1).

Připojení na PT:

- 400//5A, 10/15VA, 0,5%/5P10

#### **Nastavené hodnoty:**

Funkce	Nastavená hodnota
$I_S >/I_n$	1,08 x $I_n$ (432 A)
IDMT $I >$	1 EI (Extrémně inverzní)
$k_{vch}$	0,3 (nastavení sklonu charakteristiky)
$I_S >>/I_n$	3,6 x $I_n$ (1440 A)
$t >>$	0,3 (s)

## 5.5 Selektivita ochran

Vzhledem k způsobu provozu všech kogeneračních jednotek je všechny vyrobený výkon dodán do sítě. Ostrovní provoz jednotek není možný, rozvod neobsahuje žádný významný odběr krom vlastní spotřeby. Selektivita je nastavena s ohledem k nejrychlejšímu možnému odpojení kogeneračních jednotek. K tomu slouží ochrany generátorů a jako záloha vždy slouží vzduchový jistič ARION WL12. V případě selhání obou zmíněných ochran vypíná zkratový příspěvek kogenerační jednotky ochrany VIP300LL za 2 s.

Pro nově budované kogenerační jednotky na hladině VN (6,3 kV) je selektivita docílena proudovým a časovým odstupňováním jednotlivých stupňů ochran s tím, že pro nadproudové články s nižším stupněm seřiditelnosti je použit rozběhový proud roven  $1,2 \cdot I_n$ , s použitím extrémně časově závislých charakteristik. V tab. 5.5-1 je možné vidět několik hodnot proudů, pro které jsou uvedeny vypínací časy jednotlivých ochran.

V Přílohách K, L a M je možné vidět vypínací plány jednotlivých ochran. Charakteristika ochrany ARION WL12 je pro přehlednost přepočítána z napěťové hladiny 0,4 kV na hladinu 6,3 kV pomocí převodového poměru transformátoru.

Pro rozvaděč =RVN+RH a =RVN+PR je hodnota minimálního zkratového proudu  $I_{k2min}$  téměř totožná (rozdíl cca 90 A). v případě dodržení selektivity je zároveň dodržena podmínka pro všechny ochrany, kdy rozběhový proud nadproudového článku s vyšším stupněm seřiditelnosti ochrany musí být menší než hodnota nejmenšího zkratového proudu. U ochran REF není využit mžikový článek, předpokládá se, že většinu těžkých zkratu zachytí ochrany nejbližší zdrojům proudu (nadřazené sítě a samotných generátorů).

Tab. 5.5–1 Vypínací časy ochran větve KGJ2 a KGJ3

	VIP300LL	REF610_1	REF610_2	REF610_3	AT31-x1
Proud (A)	Čas vypnutí (s)	Čas vypnutí (s)	Čas vypnutí (s)	Čas vypnutí (s)	Čas vypnutí (s)
216	109,09	∞	∞	∞	∞
432	10,08	10,08	90,91	72,73	∞
540	6	6	32	25,6	∞
890	2	2	7,84	6,27	∞
1080	0,1	1,37	5	4	∞
1440	vypnuto	0,3	2,67	0,3	∞
1620	vypnuto	vypnuto	0,45	vypnuto	∞
2037	vypnuto	vypnuto	vypnuto	vypnuto	0,6

## Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout řešení vývodu výkonu pro nově budované kogenerační jednotky do sítě. To znamená navržení VN kabelů, ověření výbavy stávající kogenerační jednotky a nastavení ochrany.

Navržené VN kabely mají 2 varianty. Obě varianty vycházejí z platných postupů a norem (ČSN EN 60909-0, ČSN 38 1754, ČSN 33 3015, ČSN 33 2000-5-52 ed.2 a ČSN 33 2000-4-43 ed. 2). Tyto normy poskytují dostatečné podklady pro správný a bezpečný návrh vedení.

**První navržená varianta** je s minimální bezpečnostní rezervou (Kap. 4.3), s ohledem na tepelné účinky zkratového proudu. Průřez všech kabelů byl počítán s přihlédnutím k místu nejhoršího možného výskytu proudu  $I_{th}$ . Konkrétně vyšly kabely o průřezu 150 mm<sup>2</sup> (3x(10-AXEKVCEY 1x150)), při tomto průřezu je nutné zajistit dostatečně rychle odpojení všech zdrojů zkratového proudu a to maximálně do 1s (nejlépe mnohem dříve). I s ohledem k dodržení maximální doby trvání zkratu se nejedná o ideální variantu ve vztahu k připojeným synchronním generátorům.

**Druhá navržená varianta** je optimální. Je počítána i s dostatečnou rezervou, i v případě zpoždění vypnutí ochrany. Kabely jsou ve všech větvích (3x(10-AXEKVCEY 1x185)), při této konfiguraci kabely odolají zkratu trvajícím 1,76 s bez vážnějších následků pro jejich izolaci. Dále byla provedena kontrola správnosti výpočtu programem Zkraty 2.0, který potvrdil správnost dosažených výsledků. Jeho největší výhodou je v rychlosti zpracování dat, při čemž pomocí „ručního“ výpočtu se celkový výpočet vyšplhal na dny a v případě programu Zkraty 2.0 na několik hodin a to včetně seznámení se s programem.

Pro tuto variantu byly vypočteny ztráty v rozvodu, které jsou 25 kW. Významnou část těchto ztrát mají na svědomí NN kabely, které jsou sice nejkratší, ale vedou značné proudy (2786 A).

Dále jsou pro druhou variantu navrženy nadproudové ochrany, které jsou nastaveny s ohledem k ochranám umístěným ve vývodních polích hlavního rozvaděče, viz Kap. 5. K dosažení selektivity je využito jak proudové, tak časové odstupňování tak, že ochrany blíže kogeneračním jednotkám vypínají rychleji. Těžké zkraty jsou vypínány mžikovými ochranami u jednotlivých kogeneračních jednotek a v rozvodně distributora elektrické energie, do které je připojena přímo.

### Porovnání variant:

Obě navržené varianty byly počítány stejným způsobem a je možné je provozovat.

Pro první variantu platí, že je navržena s ohledem na co nejlevnější pořizovací náklady a má minimální bezpečnostní rezervu. K tomu je nutné adekvátně nastavit ochrany, aby vypínaly poruchy dříve, než mohou poškodit kabelové vedení.

Druhá varianta je navržena s dostatečnou bezpečnostní rezervou, ochrany mají dostatečný proudový i časový rozestup. Díky použití vyššího průřezu kabelů než v první variantě se jedná o dražší návrh.

Vzhledem k minimálnímu cenovému rozdílu mezi kabely (3x(10-AXEKVCEY 1x150) a (3x(10-AXEKVCEY 1x185)) je lepší a bezpečnější, druhá varianta, pro kterou jsou nastaveny i ochrany a provedena kontrola správnosti výpočtu.

Jako budoucí možné rozšíření práce, je návrh ochrany chránících rozvod před zemním spojením.



## Seznam použité literatury

- [1] JAROSLAV KRBEK, Bohumil Polesný. *Kogenerační jednotky - zřizování a provoz*. 1. vyd. Praha: GAS, 2007. ISBN 978-807-3281-519.
- [2] DLOUHÝ, Ing. Tomáš. *Kotelny a kogenerační jednotky* [online]. Praha [cit. 2014-10-12]. Dostupné z: <http://fsinet.fsid.cvut.cz/cz/U207/U2072/projektII.pdf>. ČVUT.
- [3] KARAFIÁT, CSC., Ing. Josef. SBORNÍK TECHNICKÝCH ŘEŠENÍ ZDROJŮ S KOMBINOVANOU VÝROBOU ELEKTŘINY A TEPLA. In: Praha, 2006, s. 66. Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/dokument/15.pdf>
- [4] Jednička na trhu v malé kogeneraci. [online]. [cit. 2014-10-12]. Dostupné z: <http://www.cezenergo.cz/cs/uvod.html>
- [5] *Kombinovaná výroba - efektivní a ekologické využití paliva* [online]. [cit. 2014-10-12]. Dostupné z: <http://www.kombinovana-vyroba.cz/>
- [6] PAUZA, Josef. *Zkratky v elektrických rozvodech*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1970.
- [7] DOLEŽAL, Jaroslav, Jiří ŠŤASTNÝ, Jan ŠPETLÍK, Stanislav BOUČEK a Zbyněk BRETTSCHEIDER. *Jaderné a klasické elektrárny*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 259 s. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [8] ČSN EN 60909-0.: *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách*. Květen 2002.
- [9] ČSN 38 1754: *Dimenzování elektrického zařízení podle účinku zkratových proudů*. Červenec 1974
- [10] ČSN 33 3015: *Elektrotechnické předpisy. Elektrické stanice a elektrická zařízení. Zásady dimenzování podle elektrodynamické a tepelné odolnosti při zkratech*. Duben 1983
- [11] ČSN 33 2000-5-52 ed.2. *Elektrické instalace nízkého napětí - Část 5-52: Výběr a stavba elektrických zařízení - Elektrická vedení*. Praha, Únor 2012
- [12] ČSN 33 2000-4-43 ed. 2. *Elektrické instalace nízkého napětí - Část 4-43: Bezpečnost - Ochrana před nadproudy*. UNMZ, Prosinec 2010.
- [13] Gas turbine SGT5-8000H. *Energy.siemens.com* [online]. [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.energy.siemens.com/us/en/fossil-power-generation/gas-turbines/sgt5-8000h.htm#content=Description>
- [14] Princip kogenerační jednotky s pístovým spalovacím motorem. *Bioplyn.cz* [online]. [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: [http://www.bioplyn.cz/at\\_popis.htm](http://www.bioplyn.cz/at_popis.htm)
- [15] PAWLAS, Jaroslav a Martin PAWLAS. ELCOM, a.s. – Divize Realizace a inženýring. *Zkratý 2.0 Program pro výpočet zkratových proudů*. 12/2007. E0021752 rev.3.
- [16] PŘÍLOHA 4 PRAVIDLA PRO PARALELNÍ PROVOZ ZDROJŮ SE SÍTÍ PROVOZOVATELE DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY. In: *PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ*

*DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV*. ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD, listopad 2011. Dostupné z: <http://www.eru.cz/documents/10540/479758/Pril4.pdf/27f46421-597b-4d63-828c-50a36b87d968>

[17] VIP300 User's manual. In: *Schneider Electric* [online]. 01/2013 [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: [http://www2.schneider-electric.com/resources/sites/SCHNEIDER\\_ELECTRIC/content/live/FAQS/180000/FA180201/en\\_US/VIP300%20-%20User%20manual%202013-En.pdf](http://www2.schneider-electric.com/resources/sites/SCHNEIDER_ELECTRIC/content/live/FAQS/180000/FA180201/en_US/VIP300%20-%20User%20manual%202013-En.pdf)

[18] Feeder Protection Relay REF610: Technical Reference Manual. In: *ABB.com* [online]. 05.10.2004 [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: [http://www09.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/d2c1293e027086d9c125794a004841df/\\$file/REF610\\_TRM\\_755310\\_ENh\\_IEC.pdf](http://www09.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/d2c1293e027086d9c125794a004841df/$file/REF610_TRM_755310_ENh_IEC.pdf)

## Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma zapojení s protitlakou parní turbínou [1] .....	8
Obr. 2 Schéma zapojení kondenzační parní turbíny s odběrem páry[1] .....	8
Obr. 3 Plynová turbína Siemens SGT5-8000H s výkonem 375 MW při účinnosti 40 %, 570 MW při kombinovaném cyklu s účinností přesahující 60 % [13] .....	10
Obr. 4 Kogenerační jednotka s pístovým motorem [14] .....	11
Obr. 5 Paroplynová jednotka s plynovou turbínou [1] .....	13
Obr. 6 Paroplynová jednotka se spalovacím motorem [1] .....	14
Obr. 7 Celkové schéma sítě .....	18
Obr. 8 Nastavení spouště ETU25B .....	40
Obr. 9 Vypínací charakteristika jističe ARION WL12 .....	40

## Seznam tabulek

Tab. 1.1.2–1 Porovnání kogeneračních zařízení [2].....	3
Tab. 1.2.1–1 Modelový příklad energetického přínosu kogenerační jednotky .....	4
Tab. 2–1 Přehled el. výkonů kombinované výroby [5].....	7
Tab. 2.3–1 Přehled typických parametrů kogeneračních jednotek se spalovacími motory [3].....	12
Tab. 2.4–1 Běžné účinnosti paroplynového cyklu [3] .....	13
Tab. 4.2–1 Legenda tabulek .....	19
Tab. 4.3–1 Přehled navrhovaných kabelů .....	21
Tab. 4.3.2–1 Parametry nadřazené soustavy pro výpočet zkratových poměrů .....	23
Tab. 4.3.2–2 Parametry synchronních generátorů pro výpočet zkratových poměrů.....	23
Tab. 4.3.2–3 Parametry transformátorů pro výpočet zkratových poměrů.....	24
Tab. 4.3.2–4 Parametry kabelů pro výpočet zkratových poměrů (K3-K7 S=150 mm <sup>2</sup> ) .....	25
Tab. 4.3.3–1 Výsledné hodnoty zkratových jevů (K3-K7 S=150 mm <sup>2</sup> ) .....	26
Tab. 4.3.3–2 Výsledné hodnoty zkratových jevů (K3-K7 S=150 mm <sup>2</sup> ) .....	26
Tab. 4.4.1–1 Parametry kabelů pro výpočet zkratových poměrů (K3-K7 S=185 mm <sup>2</sup> ) .....	28
Tab. 4.4.2–1 Provozní teploty kabelů (K3-K7 S=185 mm <sup>2</sup> ).....	28
Tab. 4.4.3–1 Výsledné hodnoty zkratových jevů (K3-K7 S=185 mm <sup>2</sup> ) .....	29
Tab. 4.4.3–2 Výsledné hodnoty zkratových jevů (K3-K7 S=185 mm <sup>2</sup> ) .....	29
Tab. 4.4.5–1 Proudová zatížitelnost NN kabelů.....	32
Tab. 4.4.5–2 Provozní teplota kabelů NN 8x(1-CYKY 3x240+120) .....	32
Tab. 4.4.6–1 Porovnání výsledku zkratového proudu $I_k$ “ .....	35
Tab. 4.4.6–2 Porovnání výsledku zkratového proudu $I_{k2}$ “ .....	35
Tab. 4.4.6–3 Porovnání výsledku součinitele $\kappa$ .....	35
Tab. 4.4.6–4 Porovnání výsledku nárazového zkratového proudu $i_p$ .....	36
Tab. 4.4.6–5 Porovnání výsledku součinitele $m$ .....	36
Tab. 4.4.6–6 Porovnání výsledku ekvivaletního oteplovacího proudu $I_{th}$ .....	36
Tab. 4.4.7–1 Elektrické ztráty VN kabelů.....	37
Tab. 4.4.7–2 Elektrické ztráty NN kabelů.....	37
Tab. 5.1–1 Doporučená nastavení síťové ochrany dle [16] .....	39
Tab. 5.1–2 Nastavení síťové ochrany generátoru .....	39
Tab. 5.5–1 Vypínací časy ochran větve KGJ2 a KGJ3.....	45